

**FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO**



# **Qualidade de energia: produção descentralizada, desafios e soluções**

**José Eduardo Morgado Rodrigues**

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Professor Doutor João Paulo da Silva Catalão

Co-orientador: Doutor Eduardo Manuel Godinho Rodrigues

30 de Julho de 2017



# Resumo

A finalidade deste trabalho passa, sobretudo, pela investigação do que define a qualidade da energia, de perceber o tipo de fatores e as razões que a deterioram, bem como pela necessidade premente de acionar possíveis soluções que possam responder, com eficácia, a constrangimentos que emergem de mudanças que conduziram a um novo paradigma no setor energético.

A busca de respostas, feita principalmente na literatura disponível, para os problemas que a rede enfrenta, encontrar as suas causas e formas de mitigação desses problemas, constituiu-se, ao longo deste estudo, como um desafio aliciante a vencer. Apesar dos obstáculos, muitas respostas foram encontradas e figuram nos capítulos desta dissertação.

Todavia, o trabalho ficaria incompleto sem a análise do impacto da introdução das energias renováveis numa rede simulada na ferramenta "Simulink" do software MATLAB, a qual foi feita no capítulo 5.

Em suma, ao longo deste trabalho é possível perceber quais os mecanismos "poluidores" da qualidade de energia, e sensibilizar para o problema da mudança de paradigma que está a ser ditada pela crescente introdução de energias renováveis.



# Abstract

The aim of this thesis is, mostly, to investigate what defines energy quality, to understand the kind of factors and reasons which may affect it in a negative way, as well as the eminent need to apply possible solutions that may answer, effectively, to constraints that arise from changes which led to the rising of a new paradigm in the energetic field.

The search for answers, mostly done through available literature, to the problems the network faces, finding its causes and ways to mitigate it, was found throughout the process of this investigation, to be a captivating challenge to overcome. Despite the obstacles, several answers were disclosed and are enlightened in the following chapters.

However, this thesis would be incomplete without the analysis of the impact of the introduction to renewable energies in a simulated network built on the application “Simulink” from a MATLAB simulator in chapter 5.

All things considered with this work it is possible to acknowledge and understand which degradation mechanisms affect the quality of energy as well as function as an alerting message to the problem arising by the change of paradigm that is being done by the ongoing rise of renewable energy.



# Agradecimentos

Esta secção, mais pessoal, foi a última que escrevi. Durante tanto tempo pensamos em tantas frases soltas para dizer. Mas, no que toca a ligar todas elas, a dificuldade é grande. Obviamente, uma secção de agradecimentos poderia ser bastante fácil, pois poder-se-iam apenas nomear as pessoas e rematar com um agradecimento.

No entanto, qualquer português deveria saber que, apenas na sua língua, existe a palavra obrigado. São três os níveis de agradecimento, o mais superficial, o intermédio e um mais profundo. O primeiro, é o nível do reconhecimento intelectual, o nível cognitivo do reconhecimento. O segundo nível é o nível do agradecimento, do dar graças a alguém por aquilo que esse alguém fez por nós. O terceiro nível, mais profundo agradecimento, é o nível do vínculo, é o nível em que nos sentirmos vinculados e comprometidos com alguém. Em inglês, ou em alemão, agradece-se com o nível mais superficial da gratidão, “thank you” ou “zu danken” agradecem na forma intelectual. Na maior parte das outras línguas europeias, agradece-se no nível intermédio da gratidão, quando se diz “merci” em francês quer dizer dar uma mercê, dar uma graça, assim como “gracias” em espanhol, dou-lhe uma graça por aquilo que me trouxe. Mas só em Português, se agradece com o terceiro nível de gratidão, o mais profundo, vinculativo nível de agradecimento. Obrigado quer dizer isso mesmo, fico-vos obrigado, fico obrigado perante vós, vinculado, comprometido.

Assim, começaria por deixar o meu obrigado ao Professor Doutor João Paulo da Silva Catalão e ao Doutor Eduardo Manuel Godinho Rodrigues, por me terem permitido executar este trabalho, por me terem apoiado em todas as decisões que fui tomando.

Obrigado aos meus amigos, os do Porto e os de Viseu, pelas variadas aventuras. Pelos longos cafés no Celta, pelas comemorações de aniversários que duram mais do que dois dias, pelas viagens à neve ou simplesmente pelas conversas que, hoje, só são possíveis pelo Skype. Pelo nosso percurso no associativismo, pelas nossas batalhas ganhas e perdidas. Obrigado, por nunca terem duvidado de mim, pela ajuda inacreditável que me deram pelo curso fora. Em Viseu, Leça, Gaia, Penafiel, Amarante, Vale de Cambra ou simplesmente na rua António Cruz. Sem a vossa boleia, o fim desta subida não seria possível.

## **Obrigado.**

Aos meus primos e primas pelo país fora que tanto gostam de mim, é verdade que tenho estado muito ausente e com menos tempo dedicado do que gostaria, mas família é sempre família.

Ao meu padrinho, é verdade que vives em França, mas o teu percurso sempre me fascinou. Nunca esquecerei as minhas pequenas “férias” em Nice. Numa altura em que voltar à FEUP não era opção, fizeste-me compreender o valor do trabalho. Fizeste-me ver a diferença entre crescer com escadas de plástico ou de metal e passaste-me ensinamentos muito valiosos dos quais fiz e faço uso.

Aos meus avós e tias que sempre estiveram por perto. Nunca poderei retribuir-vos, de facto, aquilo que já me deram. A família é assim mesmo, dar sem esperar receber nada em troca. Só espero retribuir de alguma forma o amor que me presentearam durante todos estes anos. E fica a promessa que vos apoiarei, sempre, em tudo o que precisarem.

À minha segunda mãe, que vive no Porto, os jantares e almoços, o amor e o apoio que senti, nunca poderei retribuir. Vamos continuar pertinho. Gosto mesmo muito de ti e espero que, mesmo nos piores momentos, não te esqueças da maravilhosa família que tens ao teu redor e que te apoies nisso mesmo. Quero muito que sejas feliz, a tua felicidade é também a minha.

À minha companheira, namorada, amiga e confidente. Ambos sabemos a influência que tiveste em mim desde que te conheci e o papel que tomaste nesta fase da minha vida, na verdade, deveria dizer-to mais vezes. Ainda temos muito tempo para desfrutar e muitas aventuras para viver. Sei que contigo terei sempre a moderação e a ponderação que tantas vezes me faltam.

À minha irmã, que é irmã, e não nos poderemos desviar dos sentimentos que tal implica. Vi-te crescer e acompanhei a tua progressão. Cada vez mais a diferença de idades se nota menos. Estás a plena velocidade no percurso que eu agora termino. Cá estarei para te dar sempre bons conselhos de irmão mais velho.

E por fim, o mais difícil. Aos meus pais, aos quais dedico esta tese que culmina o fim da educação por vós dada. É bastante óbvio dizer que são os melhores pais do mundo e que fizeram tudo por mim. É também claro, que o vosso apoio é sempre incondicional. Mas deveriam suportar tudo isto? As primeiras etapas a ultrapassar foram realmente muito duras, estivemos quase a desistir. Descemos um pouco para recuperar o fôlego mas voltámos a subir. Só falta a reta final...

É hora de abraçar uma nova etapa no mundo do trabalho, sabendo que, convosco é mais fácil.

José Rodrigues



*‘Não menosprezes nada nem ninguém’*  
”

Do meu pai



# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Contextualização . . . . .	1
1.2	Objetivos da dissertação . . . . .	4
1.3	Estrutura da Dissertação . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Qualidade da energia</b>	<b>5</b>
2.1	Introdução . . . . .	5
2.2	Frequência . . . . .	6
2.3	Tensão . . . . .	8
2.3.1	Desequilíbrios de tensão . . . . .	9
2.3.2	Variações de amplitude de tensão . . . . .	11
2.3.3	Variações rápidas de tensão (efeito "Flicker") . . . . .	13
2.4	Distorção da forma de onda . . . . .	14
2.4.1	Harmónicos . . . . .	14
2.4.2	Inter-harmónicos . . . . .	15
2.4.3	Notching . . . . .	15
2.4.4	Ruído . . . . .	15
2.4.5	Tensão de Offset . . . . .	15
2.5	Fator de Potência . . . . .	15
2.5.1	Problemas . . . . .	17
2.5.2	Correção do Fator de Potência . . . . .	17
2.6	Síntese . . . . .	18
<b>3</b>	<b>Produção distribuída no contexto atual</b>	<b>19</b>
3.1	Introdução . . . . .	19
3.2	Paradigma convencional e atual . . . . .	19
3.3	Energia eólica . . . . .	22
3.3.1	Integração Eólica no SEE . . . . .	24
3.3.2	Tecnologias existentes . . . . .	29
3.3.3	Tecnologias inovadoras . . . . .	31
3.4	Energia solar . . . . .	32
3.4.1	Integração Solar no SEE . . . . .	34
3.4.2	Tecnologias existentes . . . . .	35
3.4.3	Tecnologias Inovadoras . . . . .	38
3.5	Síntese . . . . .	40

<b>4</b>	<b>Mitigação dos problemas</b>	<b>41</b>
4.1	Soluções para melhorar a qualidade da energia . . . . .	41
4.2	Seleção do equipamento apropriado . . . . .	42
4.3	Procedimentos para regular a qualidade da energia . . . . .	43
4.3.1	Identificar os problemas inerentes à qualidade de energia . . . . .	44
4.3.2	Colecionar dados . . . . .	45
4.3.3	Monitorização e desenvolvimento de um programa de medida . . . . .	45
4.3.4	Avaliar as medidas recolhidas e desenvolver as soluções . . . . .	45
4.4	Síntese . . . . .	47
<b>5</b>	<b>Análise da qualidade da energia perante integração de penetração fotovoltaica</b>	<b>49</b>
5.1	Estudo do perfil da rede com e sem microprodução . . . . .	52
5.1.1	Perfis de tensão sem microgeração . . . . .	53
5.1.2	Perfis de tensão com micro geração . . . . .	54
5.1.3	Análise da Potência ativa e reativa . . . . .	55
5.1.4	Perdas Ativas . . . . .	57
5.2	Análise do impacto da introdução de PDIS de potência igual à contratada . . . . .	58
5.2.1	Perfis de tensão . . . . .	58
5.2.2	Análise da potência ativa e reativa . . . . .	59
5.2.3	Perdas Ativas . . . . .	61
5.3	Controlo de potência reativa para regular a tensão . . . . .	61
5.3.1	Perfis de Tensão . . . . .	61
5.3.2	Potência Ativa . . . . .	62
5.3.3	Potencia Reativa . . . . .	63
5.3.4	Perdas Ativas . . . . .	64
5.4	Controlo de potência ativa para regular a tensão . . . . .	64
5.4.1	Perfis de tensão . . . . .	67
5.5	Fluxos de Potência Ativa e Reativa . . . . .	69
5.6	Conclusões . . . . .	71
<b>6</b>	<b>Conclusões e Trabalho Futuro</b>	<b>73</b>
6.1	Satisfação dos Objetivos . . . . .	73
6.2	Trabalho Futuro . . . . .	74
<b>A</b>	<b>Rede simulink</b>	<b>75</b>
	<b>Referências</b>	<b>81</b>

# Lista de Figuras

1.1	Tabela ilustrativa da produção das várias formas de energia [1] . . . . .	2
1.2	Percentagem anual de renovável inserida na rede [1] . . . . .	2
2.1	Complexidade na definição de QE . . . . .	5
2.2	Organograma da QE . . . . .	6
2.3	Sistemas básicos de tensões . . . . .	11
2.4	Exemplo de uma cava de tensão [2] . . . . .	12
2.5	Exemplo ilustrativo do fenómeno Voltage Sweel [2] . . . . .	12
2.6	Exemplo ilustrativo do fenómeno "Under Voltage"[2] . . . . .	13
2.7	Exemplo ilustrativo do fenómeno de Flicker"[3] . . . . .	13
2.8	"Notching"[3] . . . . .	15
2.9	Circulação de Potência Ativa e Reativa[4] . . . . .	16
3.1	Esquema tradicional de distribuição de energia [5] . . . . .	20
3.2	Esquema com PDIS integrada na rede [5] . . . . .	20
3.3	Capacidade eólica(azul) e solar (amarelo) [6] . . . . .	21
3.4	[7] . . . . .	22
3.5	Distribuição mundial do ventos médios por ano [8] . . . . .	23
3.6	Dimensão cronológica das turbinas [8] . . . . .	24
3.7	Esquema ilustrativo de um SEE [9] . . . . .	25
3.8	Organograma para avaliar viabilidade de investimentos na rede . . . . .	28
3.9	Esquema de uma turbina de velocidade fixa[10] . . . . .	29
3.10	Esquema de uma turbina de velocidade variável [10] . . . . .	30
3.11	"Doubly FED Induction Generator"esquema[11] . . . . .	30
3.12	Turbina tufão [12] . . . . .	31
3.13	Gerador de uma turbina híbrida [13] . . . . .	31
3.14	Turbina eólica flutuante [14] . . . . .	32
3.15	Plano cortado do esquema de uma torre de túnel de vento [15] . . . . .	32
3.16	Distribuição Mundial da instalação solar [16] . . . . .	33
3.17	Carta da radiação solar em Portugal continental [17] . . . . .	34
3.18	[18] . . . . .	35
3.19	Evolução Vs Eficiência [19] . . . . .	36
3.20	Telhado solar [20] . . . . .	39
3.21	Pratos espelhados 3.21 . . . . .	39
3.22	Balão Solar [21] . . . . .	40
4.1	Tecnologia reguladora vs defeito [3] . . . . .	43
4.2	Procedimento em esquema . . . . .	46

5.1	Esquema da rede de baixa tensão [5]	49
5.2	Diagrama de cargas em 24 horas	52
5.3	Perfis da tensão ao longo das 24h para as 3 fases	53
5.4	Perfis da tensão ao longo das 24h para as 3 fases	54
5.5	Fluxo de Potência ativa na linha 1-2	55
5.6	Fluxo de Potência ativa na linha 16-24	56
5.7	Fluxo de Potência reativa na linha 16-24	57
5.8	Perdas ativas sem microgeração	57
5.9	Perdas ativas com microgeração	58
5.10	Tensões nós 2, 24 e 29	58
5.11	Linha 1-2	59
5.12	Linha 16-24	59
5.13	Fluxo de potência reativa linha 1-2 e linha 16-24	60
5.14	Perdas Ativas	61
5.15	Perfis de tensão	62
5.16	Fluxo de Potencia Ativa	63
5.17	Fluxo de Potencia Reativa	63
5.18	Topologia P-V	64
5.19	Perfis de tensão antes do controlo	65
5.20	Perfis de tensão atualizados	67
5.21	À esquerda, a potência cortada para $V1=1.05$ PU e à direita para $V1=1.08$ PU	68
5.22	Registo das tensões após implementação das configurações	69
5.23	Perfis de potência ativa e reativa	70
5.24	Perdas ativas	70
A.1	Rede sem micro geração	76
A.2	Outro pedaço da rede sem micro geração	77
A.3	Rede com micro geração focada na alteração	78
A.4	Alteração da quantidade de microprodução para igualar a carga	79
A.5	Introdução do bloco "Lookup table" nas unidades de microgeração	79
A.6	Bloco corretor das sobretensões sem otimização de potência cortada	80
A.7	Bloco corretor das sobretensões com otimização de potência cortada	80

# Lista de Tabelas

2.1	Fases de controlo de frequência . . . . .	7
5.1	Caracterização dos ramos da rede de baixa tensão . . . . .	50
5.2	Potências contratadas por fase . . . . .	50
5.3	Potência Instalada em unidades de microprodução . . . . .	51
5.4	Diagrama cargas durante 24 horas . . . . .	51
5.5	Tabela ilustrativa dos valores máximos de tensão por fase . . . . .	66
5.6	Configurações tomadas para cada módulo PV das microgerações . . . . .	68





# Abreviaturas e Símbolos

BIPV	"Building Integrated Photovoltaics"
BT	Baixa Tensão
CSP	"Concentrated Solar Energy"
Db	Decibel
DFIG	"Double Fed Induction Generator"
DVR	Dynamic Voltage Restorer
ERSE	Entidade Reguladora do Sistema Elétrico
FP	Fator de Potência
Hz	Unidade Hertz
MT	Média Tensão
OPV	"Organic Photo Voltaics"
P	Potência Ativa
PDIS	Produção dispersa
PU	Sistema de medição por unidade
PQs	Pontos Quânticos
QE	Qualidade de Energia
QGBTs	Quadro Geral de Baixa Tensão
RMS	"Root Mean Square"
SEE	Sistema Elétrico de Energia
UPS	"Uninterruptible Power Supply"
Var	Volt-Ampere Reativo
W	WATT



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Contextualização

Hoje como ontem, a energia é um recurso essencial e indispensável a toda a produção, desde as grandes máquinas até ao movimento de qualquer partícula. Para suprir as necessidades de uma sociedade cada vez mais exigente, emerge a necessidade de encontrar diferentes formas de energia capazes de responder, com eficiência e eficácia, a essas necessidades, fazendo assim face ao desafio energético quotidiano.

A produção de energia, a partir de combustíveis fósseis, é uma realidade que ainda assume grandes proporções, apesar de aumentar a integração de agentes poluentes na atmosfera tão nocivos à vida no Planeta e de ser um recurso "esgotável". Encontrar formas alternativas de produção de energia tem vindo a ser um propósito de muitos estudiosos desta matéria.

Assim, tem surgido a velocidade moderada, a integração de energias renováveis no sistema elétrico, tanto a nível nacional como a nível mundial. Estas energias, produzidas a partir do sol, do vento ou da água, reúnem potencial necessário capaz de reduzir a dependência dos combustíveis fósseis. Torna-se, no entanto, necessário desenvolver e implementar as tecnologias inerentes à sua sustentação. A Europa, como não tem grandes reservas petrolíferas, tem mostrado interesse em assumir esse papel ao promover e apoiar as mais diversas ações de modo a que os resultados sejam otimizados.

Apesar da integração das energias renováveis ser um processo natural e decorrente da sua evolução, esta acarreta bastantes dificuldades, do lado do controlo, pelo facto da produção ser muito inconstante e, para além disso, alterar o paradigma sobre o qual as redes foram construídas, já que estas foram concebidas para fazer fluir a energia de montante para jusante. Por este motivo, as próprias redes têm de se adaptar ou as fontes distribuídas têm de se ajustar.

Desta forma, a eletrónica de potência assume um papel preponderante no sentido de mitigar os problemas associados à integração de produção renovável ou dispersa, sem descurar o objetivo de manter os parâmetros da tensão, corrente e frequência nos valores normalizados. O desafio passa, agora, pela adaptação da rede com mais e melhores tecnologias capazes de acelerar o processo de equilíbrio, mas tendo sempre em atenção o custo /benefício dos investimentos efetuados.

A figura 1.1, abaixo representada, mostra a quantidade de energia renovável produzida relativamente ao total produzido em 2015. No geral, verifica-se um crescimento da energia instalada na Europa dos 28, onde Portugal se mantém na média europeia, contribuindo com 3 % deste total.

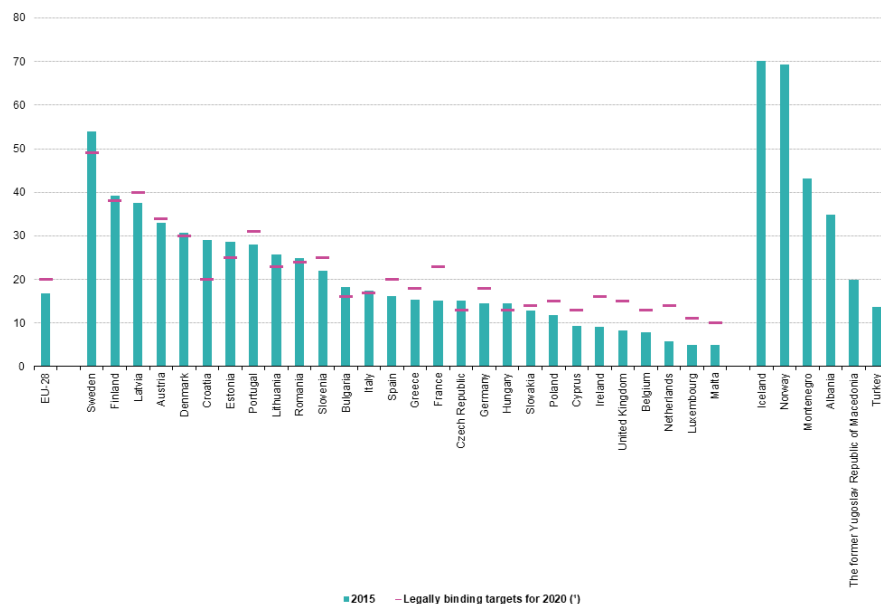
	Primary production (thousand toe)		Share of total, 2015 (%)				
	2005	2015	Biomass & waste	Hydropower	Wind energy	Solar energy	Geothermal
<b>EU-28</b>	<b>119 878.7</b>	<b>205 043.2</b>	<b>63.5</b>	<b>14.3</b>	<b>12.7</b>	<b>6.4</b>	<b>3.2</b>
Belgium	874.8	2 958.6	73.1	0.9	16.2	9.7	0.1
Bulgaria	1 123.8	2 032.6	61.3	23.9	6.1	6.9	1.6
Czech Republic	2 274.1	4 279.3	90.3	3.6	1.2	5.0	0.0
Denmark	2 513.8	3 528.4	63.0	0.0	34.4	2.4	0.1
Germany	16 850.5	38 886.1	67.5	4.2	17.5	10.3	0.5
Estonia	692.2	1 286.3	95.0	0.2	4.8	0.0	0.0
Ireland	366.1	990.7	34.0	7.1	57.6	1.3	0.0
Greece	1 643.4	2 640.7	44.6	19.9	15.0	20.1	0.4
Spain	8 397.7	16 873.5	41.5	14.3	25.1	18.9	0.1
France	15 728.2	21 416.9	65.0	21.9	8.5	3.4	1.0
Croatia	1 855.4	2 227.6	71.1	24.7	3.1	0.7	0.5
Italy	13 328.5	23 563.9	45.6	16.6	5.4	9.2	23.2
Cyprus	47.7	118.0	15.8	0.0	16.1	66.8	1.4
Latvia	1 853.8	2 330.1	92.6	6.9	0.5	0.0	0.0
Lithuania	899.8	1 466.1	92.7	2.0	4.7	0.4	0.1
Luxembourg	71.6	113.0	75.2	7.5	7.8	9.6	0.0
Hungary	1 189.1	3 239.9	93.6	0.6	1.8	0.7	3.3
Malta	0.5	14.8	16.9	0.0	0.0	83.1	0.0
Netherlands	1 970.1	4 810.4	82.6	0.2	13.5	2.6	1.2
Austria	7 078.7	9 303.3	58.1	34.2	4.5	2.9	0.4
Poland	4 549.4	8 635.2	86.5	1.8	10.8	0.6	0.3
Portugal	3 474.7	5 182.1	59.9	14.4	19.3	2.9	3.6
Romania	4 984.2	5 935.0	62.3	24.1	10.2	2.9	0.5
Slovenia	773.9	1 025.6	60.4	31.9	0.0	3.4	4.2
Slovakia	861.0	1 591.6	75.6	20.9	0.0	3.1	0.4
Finland	8 163.8	10 394.4	84.2	13.9	1.9	0.0	0.0
Sweden	14 825.6	18 374.5	57.0	35.2	7.6	0.1	0.0
United Kingdom	3 486.4	11 834.7	60.2	4.6	29.3	5.9	0.0
Iceland	2 383.6	4 917.2	0.0	24.1	0.0	0.0	75.8
Norway	12 955.6	13 266.5	9.0	89.4	1.6	0.0	0.0
Montenegro	306.0	326.4	60.7	39.3	0.0	0.1	0.0
The former Yugoslav Republic of Macedonia	343.2	399.4	54.7	40.2	2.6	0.5	2.0
Albania	694.3	733.3	29.2	69.1	0.0	1.7	0.0
Serbia	1 937.4	1 984.0	56.0	43.7	0.0	0.0	0.3
Turkey	10 130.6	15 673.9	20.5	36.8	6.4	5.4	30.8
Bosnia and Herzegovina (*)	697.5	2 277.7	77.6	22.4	0.0	0.0	0.0
Kosovo (*)	176.2	268.4	95.4	4.5	0.0	0.1	0.0

(\*) 2014 instead of 2015.

(\*) This designation is without prejudice to positions on status, and is in line with UNSCR 1244/1999 and the ICJ Opinion on the Kosovo declaration of independence.

Source: Eurostat (online data code: nrg\_107a)

Figura 1.1: Tabela ilustrativa da produção das várias formas de energia [1]



(\*) Non-member countries: not applicable.

Source: Eurostat (online data code: nrg\_ind\_335a)

Figura 1.2: Percentagem anual de renovável inserida na rede [1]

O gráfico da figura 1.2 permite fazer uma análise, em termos percentuais, do total de energia que cada país colocou na sua rede de energia até 2015, bem como da previsão feita para 2020.

Em face dos dados, é possível concluir que a introdução de energia renovável no sistema elétrico é uma realidade e com tendência a aumentar, sendo que esta introdução, muitas vezes distribuída, causa um impacto negativo na rede, pois, para além de aumentar as tensões nos barramentos onde a energia entra, esta não tem a qualidade (nem em termos de frequência, nem de amplitude) necessária para poder entrar na rede de distribuição e, por isso, necessita de ser “tratada”.

É neste contexto que o problema desse “tratamento” se torna relevante e a introdução de conversores acoplados às fontes de energia tem vindo a ganhar importância. Estes conversores têm a função de controlar a frequência e a amplitude de saída da onda produzida pelas energias em causa. Interessa, no entanto, que tal conversor seja capaz de gerar uma onda trifásica compatível com onda que circula na rede.

Com a crescente integração de produção dispersa na rede, mais controladores e conversores eletrónicos entram também no sistema, substituindo até muitos dos componentes da rede convencional.

### **O que é uma energia com qualidade?**

O conceito de QE (Qualidade de Energia) tem suscitado muitas interrogações e dificuldades. Nesta era dos dispositivos eletrónicos super sofisticados, o trabalho que é feito com vista a otimizar este conceito é evidente. A utilização em massa destes dispositivos tem complicado todos os aspetos relativos à qualidade da energia elétrica.

Nas últimas duas décadas, a utilização de aplicações eletrónicas, computadores, balastros eletrónicos e aparelhos de processamento digital tem vindo a crescer de forma exponencial. A qualidade da energia está diretamente relacionada com a carga que alimenta, mas todos estes aparelhos são caracterizados por serem cargas não lineares que pedem uma corrente num intervalo de tempo muito mais curto em relação ao meio ciclo da forma de onda de tensão o que, por sua vez, origina uma queda de tensão não linear na impedância da linha, deixando de ter uma tensão adequada para as cargas circundantes. No entanto, estes mesmos aparelhos são responsáveis pelo consumo de energia reativa na rede assim como introduzir alguns harmónicos, que deterioram a qualidade da energia. Significa isto que estas variações e flutuações da qualidade de serviço da rede elétrica se tornaram numa grande preocupação por parte dos operadores da rede, porque quaisquer problemas que a rede enfrente são da responsabilidade do distribuidor e, rapidamente, se podem tornar muito dispendiosos.

Os dispositivos supramencionados, dada a sua elevada sensibilidade, são também muito úteis no controlo da magnitude da tensão nos barramentos. Todavia, introduzem correntes de fuga na rede por causa do seu funcionamento não linear o que deteriora a qualidade da energia elétrica, podendo dar origem a diversos problemas tais como danos materiais, perda de dados ou o efeito de tremulação o que, por vezes, conseguimos ver nos ecrãs dos nossos dispositivos. Poderemos, assim, concluir que a qualidade de energia se define pela qualidade da performance elétrica.

## 1.2 Objetivos da dissertação

Esta dissertação almeja refletir sobre os problemas advindos da instalação de energias renováveis na rede, pelo que, os grande objetivos deste trabalho são:

- Perceber o paradigma energético atual;
- Fazer o levantamento de problemas que assolam a qualidade da energia;
- Analisar as tecnologias renováveis que aproveitam a energia do sol e do vento;
- Identificar possíveis soluções a aplicar para fazer face aos problemas.

## 1.3 Estrutura da Dissertação

No sentido de dar resposta aos objetivos previamente definidos, esta dissertação divide-se em seis capítulos.

No primeiro capítulo, supredigido, procedeu-se à apresentação de considerações genéricas acerca da temática a tratar.

No capítulo 2, apresentam-se problemáticas que a rede enfrenta, no exercício da sua atividade, que interferem na qualidade da energia.

No capítulo 3, são abordadas duas formas de energia renovável considerada como dispersa, a eólica e a solar, percorrendo as tecnologias que são aplicadas à atualidade e as tecnologias futuras bem como a forma da sua integração da rede.

No capítulo 4, são apresentadas soluções que visam a mitigação destes mesmos problemas, assim como o procedimento a aplicar aquando da instalação dos aparelhos de correção.

No capítulo 5 simulou-se o impacto decorrente da instalação de microproduções solares em pontos a jusante da rede a partir de uma rede elétrica simulada em MATLAB.

O último capítulo, o 6 pretende sintetizar as principais linhas deste estudo e fazer um balanço dos resultados encontrados.

## Capítulo 2

# Qualidade da energia

Neste capítulo, far-se-á uma abordagem aos desafios diários da rede que condicionam a qualidade energética, tanto do ponto de vista da frequência, como da regulação de tensão.

### 2.1 Introdução

O desenvolvimento tecnológico dos últimos anos tem obrigado as entidades reguladoras a assumirem uma preocupação cada vez maior com qualidade da energia que entregam aos consumidores. Com efeito, considera-se como factua que os componentes eletrónicos aplicados a toda a tecnologia, dada a sua sensibilidade e comutação frequente da tensão que recebem, são grandes poluidores da tensão e corrente da rede, introduzindo harmónicos que deterioram a qualidade da energia do SEE (Sistema Eléctrico de Energia).

Perante tais constatações, poder-se-á definir a QE como a ausência de qualquer perturbação que afete a operação de um qualquer equipamento recetor. Sendo assim, e considerando este normativo, um problema de qualidade de energia caracteriza-se por qualquer distúrbio ou ocorrência manifestada nos níveis e nas formas de onda de tensão e corrente, que possa resultar em insuficiência, má operação, falha ou defeito permanente em equipamentos de um sistema eléctrico. [22]

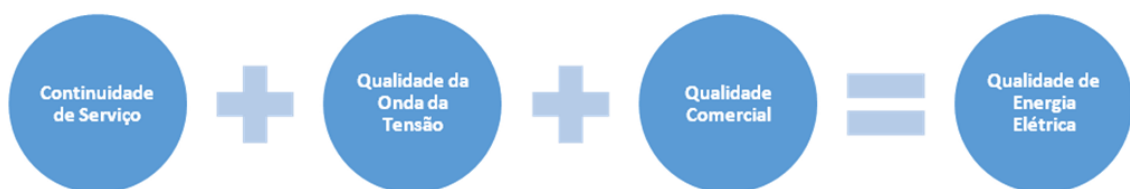


Figura 2.1: Complexidade na definição de QE

Assim, segundo a ERSE (Entidade Reguladora da Energia Elétrica), podemos classificar a QE através da análise dos seguintes fatores:

- Frequência;
- Tensão;
- Desequilíbrio do sistema trifásico de tensões;
- Poluição harmónica;
- Fiabilidade do sistema.

A figura 2.2 esquematiza os parâmetros que regem a classificação da QE.

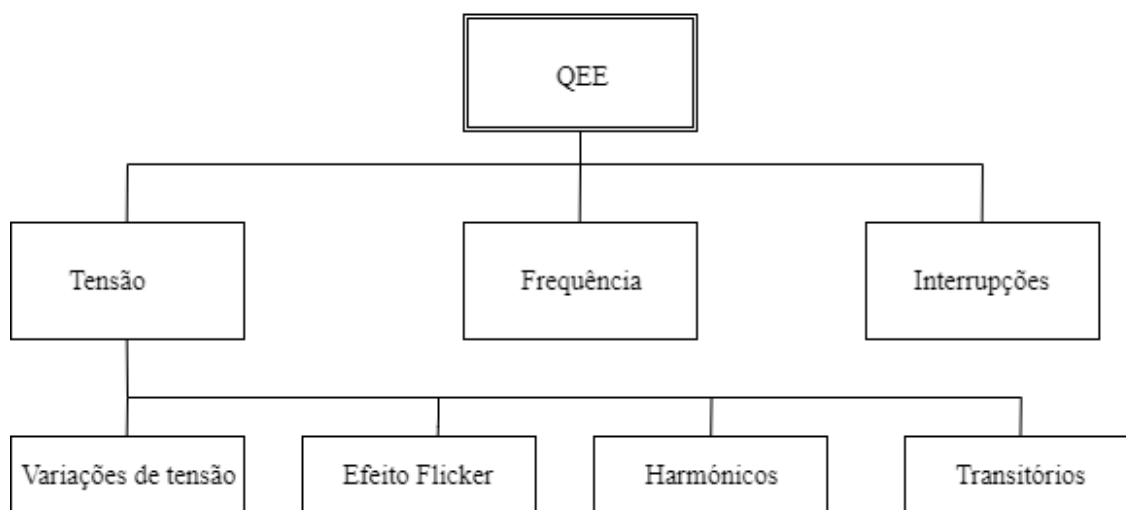


Figura 2.2: Organograma da QE

## 2.2 Frequência

No que respeita à frequência de qualquer sistema elétrico, é importante perceber como funciona o controlo de frequência de qualquer gerador síncrono. A frequência da rede Europeia situa-se nos 50 Hz (Unidade Hertz) e este valor deverá estar a ser constantemente monitorizado, já que qualquer variação exige um controlo centralizado ou local a fim de que esse valor seja reposto de forma dinâmica e rápida.

As máquinas elétricas geradoras são "as personagens principais" de todo o processo. Do ponto de vista tradicional, as máquinas são programadas para rodarem à velocidade de sincronismo com a rede, pelo que qualquer perturbação na rede, como seja o aumento ou redução de carga, ou algum defeito na rede, impõe uma variação de velocidade às máquinas, alterando a frequência de onda produzida.

Com o objetivo de fazer a correção desta problemática, poder-se-á admitir que a resposta do sistema é munida de um sistema de regulação de frequência que pode atuar em 4 fases, como as que são sumariamente enunciadas na tabela 2.1.



Tabela 2.1: Fases de controlo de frequência

Nº	Tipo de Controlo	Espaço de Tempo	Objetivos de controlo
1	Resposta Inercial	0-2s	Minimização das quedas de frequência transitórias
2	Controlo Primário	2-20s	Estabilizar a frequência
3	Controlo Secundário	20s-2min	Repor a frequência nos valores iniciais
4	Controlo Terciário	15 min	Despacho económico

Assim, na primeira fase, as máquinas desaceleram quando a frequência da rede desce da sua velocidade de sincronismo, o que significa que a carga a alimentar aumentou, todavia, quando a frequência da rede sobe do seu valor de sincronismo, as máquinas aceleram devido à carga a alimentar se ter reduzido. Esta ação é chamada de "Resposta Inercial". Esta fase é caracterizada por funcionar de forma mecânica, não envolvendo qualquer tipo de controlo inerente, pelo que a rotação da máquina irá acelerar se a carga a alimentar diminuir, ou irá desacelerar se a carga aumentar.

Após esta fase, o sistema passa ao primeiro nível de controlo que se processa da seguinte forma: Quando a frequência se desvia do seu intervalo nominal, são enviados para o sistema "set points" os quais irão influenciar as portas de admissão de forma a que a velocidade pré-estabelecida seja reposta. Este é o princípio do controlo primário que ocorre entre os 2 e os 20 segundos e assenta num princípio que é assegurado por todos os geradores da rede.

No controlo secundário, designação para um segundo nível de controlo, o restante erro de frequência existente é compensado pelo ajuste dos "set-points" do gerador.

O controlo terciário, terceiro nível de controlo, ocorre num espaço de 15 minutos, modifica os "set-points" dos geradores de forma a viabilizar a otimização do despacho. Este nível de controlo permite dividir a produção pelos geradores da forma economicamente mais rentável, ao mesmo tempo que permite o controlo da Frequência e da Potência Ativa e o controle da Tensão e da Potência Reativa.

Estes níveis de controlo têm uma estruturação bastante complexa que não será detalhada neste trabalho.

As variações de frequência, que ocorrem permanentemente no SEE ao longo do dia, apesar de pequenas, exigem uma resposta rápida e precisa do sistema. Tem-se vindo a constatar que as variações significativas da frequência ocorrem muito mais nos sistemas com centro de produção isolado e que, nem sempre, a resposta dos órgãos produtores é capaz de regular a frequência de modo a repor os valores necessários [3].

A ineficácia da resposta no que respeita à adequação da frequência pode dar origem aos seguintes problemas:

- Sobreaquecimento das fontes de alimentação;
- Ocorrência de alteração de potência debitada pelos motores AC.

A Norma 50160 [23] impõe a frequência nominal nos 50 Hz no período normal de funcionamento da rede, com uma medição de 10 segundos. O valor médio das medições da frequência

fundamental, neste período, e para redes com ligação síncrona a redes interligadas deverá estar compreendido no seguinte intervalo:

- 50 Hz  $\pm$  1% [49,5 Hz; 50,5 Hz] durante 99,5 % de um ano;
- 50 Hz  $\pm$  4% / -6% [47 Hz; 52 Hz] durante 100 % do tempo;

Há ainda outro intervalo para os sistemas sem ligação síncrona a um sistema interligado:

- 50 Hz  $\pm$  2% [49 Hz; 51Hz] durante 95% de uma semana;
- 50 Hz  $\pm$  15% [42,5 Hz; 57,5 Hz] durante 100% do tempo;

## 2.3 Tensão

As variações lentas da tensão e as variações de frequência que se verificam no sistema, resultam da ocorrência de perturbações usuais no funcionamento do SEE, resultando, por vezes, no corte de cargas, reconfiguração da rede, saída intempestiva de serviço de unidades geradoras, sendo, em geral, resolvidas pelos sistemas de controlo existentes [24].

Dada a impossibilidade de existir uma tensão absolutamente dentro do valor estabelecido, muito por causa da quantidade de cargas na rede, foram estabelecidos limites para as perturbações consideradas aceitáveis. Na rede pública, é difícil quantificar o nível global de perturbações existente, dado o desconhecimento sobre o grau de simultaneidade de funcionamento dos equipamentos e ainda atendendo à presença de cargas industriais heterogéneas com características de funcionamento complexas. [24]

Assim, nestas condições de irregularidade da tensão torna-se pouco prático usar critérios determinísticos, sendo antes preferível usar métodos probabilísticos.

Quando se procede à realização de medidas exaustivas em determinados pontos da rede e para efeitos de avaliação da qualidade da tensão, são considerados pelas normas europeias os seguintes intervalos de tempo de análise [24]:

- Tvs - ("very short interval"), correspondente a 3s;
- Tsh - ("short interval") 10 minutos;
- TL - uma hora;
- TD - 24 horas;
- Twk- uma semana.

Importa, agora, enumerar algumas das perturbações existentes no SEE que influenciam a QE.

### 2.3.1 Desequilíbrios de tensão

De acordo com a Norma 50168 [23] o desequilíbrio das tensões ocorre quando os valores eficazes das tensões das fases não são idênticos, ou os ângulos de defasamento entre fases consecutivas não são todos iguais, habitualmente  $120^\circ$  elétricos.

São problemas vulgares que ocorrem nas redes de Baixa Tensão, por exemplo, em instalações industriais com um elevado número de aparelhos monofásicos, cargas monofásicas ou fornos de indução. Este desequilíbrio pode ter origem em distribuições não equitativas das cargas por fase, em enrolamentos de transformadores com impedâncias assimétricas, na existência de sobrecargas ou desequilíbrios em diversos equipamentos e também devido à existência de curto circuitos, entre fase e neutro, não detetados.

Estas anomalias podem dar origem a problemas tão diversos como:

- Sobrecargas nos condutores;
- Sobreaquecimento de máquinas rotativas;
- Redução da capacidade de transporte das linhas aéreas;
- Mau funcionamento de sistemas eletrónicos, levando a falhas de funcionamento nos equipamentos retificadores.

É relevante perceber que a dificuldade em equilibrar as cargas leva a um aumento da corrente de neutro. Os motores de indução são um bom exemplo deste acontecimento, assim como as máquinas síncronas ou retificadores.

Nos motores de indução, o problema é criado pela componente inversa das correntes que tentam forçar o motor a rodar no sentido contrário, provocando um sobreaquecimento do aparelho e, por sua vez, a redução do seu tempo de vida útil.

Nas máquinas síncronas, são também as correntes inversas que criam um campo magnético no estator com velocidade contrária à velocidade de rotação, o que leva a um aumento das perdas do rotor do motor.

Os retificadores são aparelhos que, por si só, já inserem harmónicos na rede. Mas, quando existe um desequilíbrio de tensão, estes geram o 3º harmónico que pode causar ressonância, levando à danificação de componentes não lineares [25].

Para que se possa fazer esta análise dos desequilíbrios, é preciso conhecer os parâmetros necessários à sua avaliação. Segundo a norma 50168 [23], os desequilíbrios de tensão deverão ser analisados, em condições normais de funcionamento, durante cada período da semana, em que 95 % dos valores eficazes médios de 10 minutos da componente inversa da tensão de alimentação se deve encontrar no intervalo de 0 a 2 % da componente direta correspondente. Portanto, é relevante conhecer o sentido das componentes indicadas.

As tensões de um sistema trifásico equilibrado devem estar desfasadas entre si de  $120^\circ$  elétricos e com sequência antihorária.

Considere-se um sistema equilibrado com tensões  $U_1$ ,  $U_2$  e  $U_3$ . Decompondo a tensão nas suas componentes direta, inversa e homopolar, têm-se o seguinte [24]:

Grau de Desequilíbrio Inverso:

$$U_u = \frac{U_i}{U_d} \quad (2.1)$$

Grau de Desequilíbrio Homopolar:

$$U_0 = \frac{U_o}{U_d} \quad (2.2)$$

Em que:

- $U_d$ - É a componente direta da Tensão;
- $U_i$ - É a componente inversa da Tensão;
- $U_o$ - É a componente homopolar da Tensão.

Admitindo que:

$$\alpha = e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad (2.3)$$

E também:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_d + \underline{U}_i + \underline{U}_0 \quad (2.4)$$

$$\underline{U}_2 = \alpha^2 \underline{U}_d + \alpha \underline{U}_i + \underline{U}_0 \quad (2.5)$$

$$\underline{U}_3 = \alpha \underline{U}_d + \alpha^2 \underline{U}_i + \underline{U}_0 \quad (2.6)$$

$$(2.7)$$

Então pode-se concluir:

$$\underline{U}_{12} = \underline{U}_1 - \underline{U}_2 = U_d(1 - \alpha^2) + U_i(1 - \alpha) \quad (2.8)$$

$$\underline{U}_{23} = \underline{U}_2 - \underline{U}_3 = U_d(\alpha^2 - \alpha) + U_i(\alpha - \alpha^2) = \alpha(U_d(\alpha - 1) + U_i(1 + \alpha)) \quad (2.9)$$

$$\underline{U}_{12} = \frac{-\underline{U}_{23}}{\alpha} = -U_d(-2 + \alpha^2 + \alpha) \quad (2.10)$$

$$(2.11)$$

Obtendo a componente direta e inversa:

$$U_d = \frac{U_{12} - U_{23}\alpha^2}{3} \quad (2.12)$$

$$U_i = \frac{U_{12} - U_{23}\alpha}{3} \quad (2.13)$$

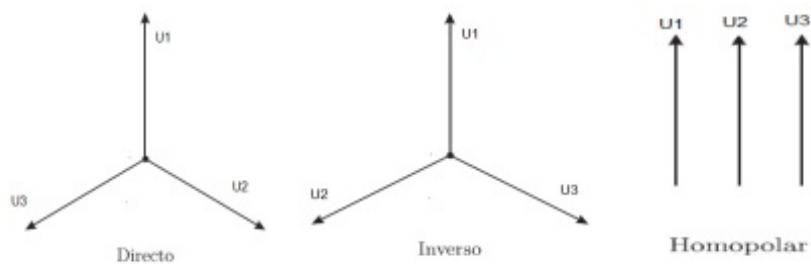


Figura 2.3: Sistemas básicos de tensões

O sistema directo é um sistema trifásico equilibrado caracterizado por ser síncrono com o sistema de origem. O sistema inverso é um sistema trifásico equilibrado, mas oposto ao sistema de origem. O sistema homopolar é um sistema em que os 3 vetores das fases têm a mesma direção e sentido, sendo utilizado para caracterizar defeitos.

### 2.3.2 Variações de amplitude de tensão

Existem diferentes tipos de pequenas perturbações de tensão que deterioram a qualidade da energia elétrica. Listam-se, de seguida, alguns desses fenómenos.

1. **Picos de tensão** podem ocorrer devido a trovoadas, ou ao desligar de cargas elevadas devido a falhas nos SEE. Ocorrem num intervalo de tempo muito curto, na ordem dos milissegundos, levando à falha de equipamentos, perda de dados e corrupção dos mesmos. Estes fenómenos podem ser atenuados utilizando filtros, transformadores isolantes e equipamentos condicionadores de potência;
2. **"Voltage sag" ou cava de tensão**, consiste na queda de tensão fora dos limites pré-estabelecidos, situando-se a magnitude deste fenómeno entre os 10 e os 90% da tensão "Root Mean Square"(RMS). Esta perturbação pode acontecer devido à entrada de cargas muito elevadas no sistema ou pela existência de falhas no mesmo. A figura 2.4 ilustra este fenómeno. Ao reduzir a tensão entregue aos equipamentos, isso implica que não tenham a energia necessária ao seu funcionamento, o que os faz falhar. A solução para esta problemática passa pela utilização de transformadores ferro-ressonantes, acumuladores de energia, UPS ("Uninterruptible Power Supply") e DVR("Dynamic Voltage Restorer");

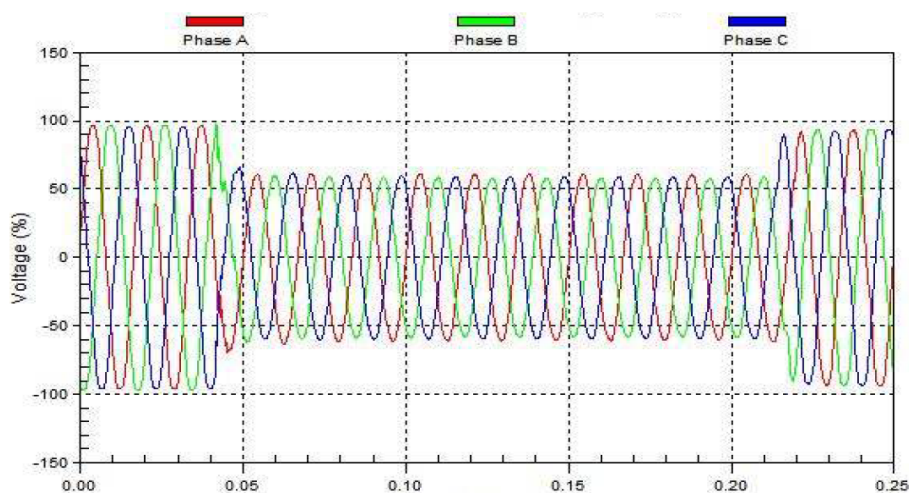


Figura 2.4: Exemplo de uma cava de tensão [2]

3. **Voltage Swell** é um crescimento da tensão fora da tolerância de 10%, tem a duração de meio ciclo a 1 minuto. Defeitos nas linhas e a saída de cargas elevadas podem originar este fenómeno, já que os equipamentos, a funcionarem acima da sua tensão nominal sobreaquecem, reduzindo o seu tempo de vida. A figura 2.5 ilustra o fenómeno. Reguladores de tensão e UPS ajudam a mitigar estes efeitos;

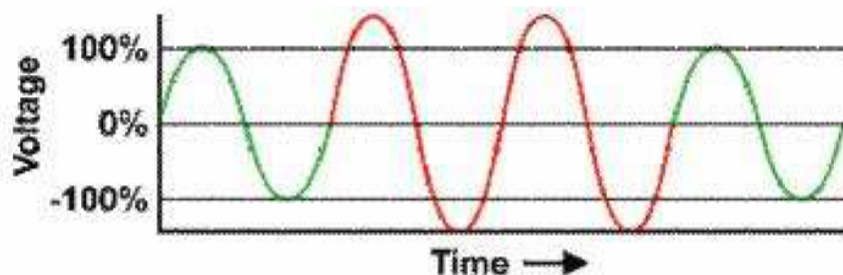


Figura 2.5: Exemplo ilustrativo do fenómeno Voltage Swell [2]

4. **"Under Voltage"** Este fenómeno caracteriza-se por uma queda permanente da tensão RMS para menos de 90 % à frequência nominal. Esta queda pode dever-se a congestionamentos nas linhas, a um excesso de carga ligada à rede e ao desligar de bancos de condensadores. Para resolver este problema estacionário, podem-se ajustar as tomadas dos transformadores, instalar mais bancos de condensadores ou melhorar a capacidade de transporte das linhas;

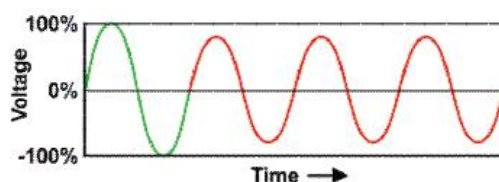


Figura 2.6: Exemplo ilustrativo do fenômeno "Under Voltage"[2]

5. **Outage** é uma completa perda da tensão, causada pela saída de serviço da linha que alimenta a carga ou por defeitos existentes na rede que impeçam a produção e o transporte da energia produzida. A solução, para este caso, passa pela existência de geradores de reserva tal como acontece, por exemplo, em hospitais.

### 2.3.3 Variações rápidas de tensão (efeito "Flicker")

Segundo a [23], uma flutuação de tensão consiste numa série de alterações da tensão ou variação cíclica da envolvente da tensão, cuja magnitude não ultrapassa os 0,9 até 1.1 PU (Sistema de medição por unidade). As cargas, que se supõem de funcionamento contínuo, como é o caso das lâmpadas, de facto, podem ter a corrente que as alimenta com variações muito rápidas e, não serem uma senoide perfeita como se pressupõe. Ao olho humano, é possível verificar este acontecimento quando as lâmpadas começam a piscar, diminuir ou aumentar a sua intensidade luminosa. Para que tal seja perceptível, basta existir uma magnitude de 0,5 % [26]. Este efeito é causado por outros aparelhos ligados à rede, tais como moinhos industriais, geradores eólicos, ventiladores de grande potência, aparelhos de soldadura, fornos de arco e motores de arranque frequente os quais deterioram a qualidade da energia que os utilizadores envolvidos recebem. Este fenómeno pode ser associado aos fenómenos de "Voltage Sags" e "Voltage swells" com ocorrência repetitiva e aleatória. Os efeitos não visíveis deste fenómeno são a deterioração contínua das máquinas e, consequentemente, o seu fim de vida.

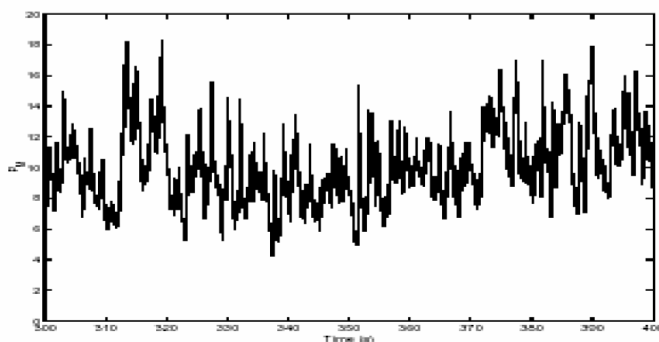


Figura 2.7: Exemplo ilustrativo do fenómeno de Flicker"[3]

Os "Static Var Compensators" podem ser instalados junto aos postos de transformação e servem para atenuar o efeito de deterioração, já antes referido, introduzindo ou consumindo potência reativa nas linhas conforme a forma de onda que existe no momento [3].

Assim, a fim de fazer a análise da severidade dos efeitos destas perturbações, devem ser tidos em atenção alguns parâmetros, a saber: [24]:

- Variação de tensão;
- Amplitude de uma variação de tensão;
- Duração de uma variação de tensão;
- Flutuação de tensão;
- Tremulação;
- Limite de irritabilidade da tremulação.

A eliminação deste tipo de perturbações pode ser conseguida de várias formas as quais se enumeram em seguida:

- Utilização de lâmpadas com sensibilidade inferior;
- Ligação de aparelhos perturbadores a tensões superiores;
- Aplicação de balastros eletrónicos;
- Utilização de arrancadores progressivos para motores com correntes de arranque muito elevadas.

## 2.4 Distorção da forma de onda

### 2.4.1 Harmónicos

Os harmónicos introduzidos na rede são a principal fonte de distorção da tensão. Um harmónico é definido como sendo uma componente superior à fundamental, da série de Fourier, de um sinal periódico. Por exemplo, num sistema europeu de 50 Hz, um harmónico de ordem 3 diz respeito à onda de frequência 150 Hz[25]. O que significa que qualquer onda pode ser decomposta na sua componente fundamental e nos seus harmónicos que, somados, originam a onda final.

Cada componente harmónica é caracterizada pela sua magnitude e pelos ângulos de fase, formando o espectro harmónico completo. É comum fazer esta avaliação através de um parâmetro a que se chama "Total Harmonic Distortion"(THD). A distorção harmónica é introduzida pelos aparelhos não lineares ligados à rede que alteram, portanto, a característica sinusoidal da onda de tensão para uma onda não sinusoidal. Um dos maiores problemas, relacionado com a distorção harmónica, é a ressonância, pois amplifica o THD de tal forma que pode danificar os aparelhos. Outros efeitos produzidos são o sobreaquecimento, o aumento das perdas e o mau-funcionamento dos aparelhos.



### 2.4.2 Inter-harmônicos

São tensões ou correntes que têm frequências que não são múltiplas da frequência fundamental da rede. Os "Cyclo-Converters" são um exemplo de aparelho que introduz inter harmônicos na rede. Este tipo de distorção, ainda bastante desconhecida, é, hoje, objeto de estudo em vários projetos.

### 2.4.3 Notching

Este tipo de problema ocorre no normal funcionamento dos dispositivos eletrônicos de potência quando a corrente é comutada de uma fase para outra. É um tipo de perturbação cujo tratamento ocorre de forma independente. As componentes harmônicas associadas podem ser muito elevadas e não serem medidas com aparelhos convencionais. A figura 2.8 ilustra o fenómeno

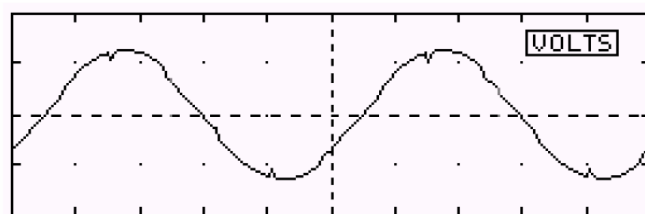


Figura 2.8: "Notching"[3]

### 2.4.4 Ruído

O ruído define-se pela existência de conteúdo elétrico de frequência superior a 200 kHz, sobreposto na tensão e corrente dos condutores de fase. A não ligação à terra dos condutores de neutro ou a má condução do mesmo provocam o aumento de ruído do sinal. Basicamente, considera-se ruído tudo aquilo que não se classifica como distorção harmônica.

### 2.4.5 Tensão de Offset

Numa onda que se quer alternada, o valor médio da onda normal deve ser nulo. Se tal não acontecer, pode estar presente uma componente contínua de tensão. Trata-se de um fenómeno que pode ocorrer devido a um distúrbio geomagnético ou causado pelas retificações de meia onda, o que provoca problemas de fluxo magnético dos transformadores e o seu sobreaquecimento.

## 2.5 Fator de Potência

[27]

O Fator de Potência caracteriza a relação angular entre os vetores de tensão e corrente de uma instalação elétrica. O ângulo resulta da potência ativa e reativa instalada. É importante ter em mente quais as expressões básicas para analisar o FP e que são as seguintes:

$$P = S \cos \varphi (W) \quad (2.14)$$

$$Q = S \sin \varphi (Var) \quad (2.15)$$

$$\tan \varphi = \frac{Q}{P} \quad (2.16)$$

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} \quad (2.17)$$

$$(2.18)$$

Onde P representa a potência ativa, Q a potência reativa, S a potência aparente e o  $\cos \varphi$  é o fator de potência.

Na rede, circula uma componente ativa e uma componente reativa da potência, apesar de, do ponto de vista mecânico, apenas a parte ativa ser útil, pois é a que realiza trabalho, a componente reativa da potência é essencial para fazer manter os campos elétricos e magnéticos das máquinas elétricas de corrente alternada.

Dependendo das circunstâncias, a Força Eletromotriz dos geradores síncronos é controlada, fazendo o ajuste da potência reativa. Quanto às unidades consumidoras, estas comportam-se, geralmente, como cargas indutivas e necessitam de potência reativa para alimentarem os seus circuitos magnéticos.

A figura 2.9 representa, de forma simplificada, a forma como o motor se alimenta de energia reativa e de energia ativa.

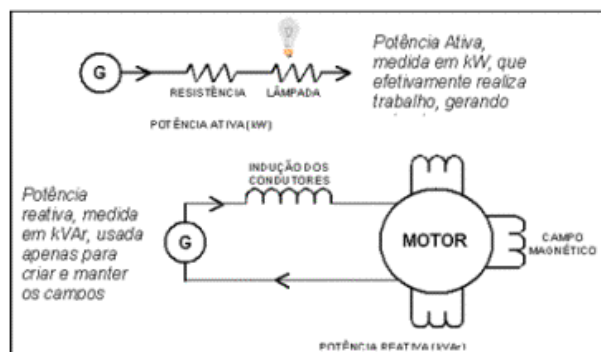


Figura 2.9: Circulação de Potência Ativa e Reativa[4]

O FP (Fator de Potência) indica qual a percentagem da energia total fornecida que é utilizada efetivamente como potência ativa. Indica, portanto, qual o grau de eficiência que tem um sistema elétrico.

Existem várias causas que levam a uma redução do FP, como por exemplo, o funcionamento de motores de indução em vazio ou a baixa carga durante um grande intervalo de tempo, motores

sobredimensionados para as máquinas acopladas, fornos a arco, fornos de indução eletromagnética, grande número de motores a funcionar a baixa potência, entre outros. No entanto, não se quer que o FP tenha um valor unitário, dado que, os vários componentes constituintes da rede necessitam de energia reativa para manterem o seu campo eletromagnético.

Em Portugal, esta energia também é faturada e depende dos valores da  $tg\phi$ . Quanto maior for o  $\cos\phi$ , menor será também o valor pago pelo consumidor, não pagando nada se o Fator de Potência estiver acima de 0,96 [28].

### 2.5.1 Problemas

A energia reativa é essencial para o funcionamento dos sistemas elétricos, no entanto, a sua utilização indevida pode dar origem aos seguintes problemas:

- Custos acrescidos para o utilizador;
- O aumento das correntes nas linhas de transporte;
- Aumento das perdas nas linhas derivado do aumento das correntes;
- Maiores quedas de tensão;
- Sobreaquecimento dos componentes do transporte.

### 2.5.2 Correção do Fator de Potência

No sentido de se conseguir fazer face a este problema, sentiu-se a necessidade de se arranjam formas capazes de corrigir o FP (Fator de Potência). A instalação de bancos de condensadores em pontos específicos da rede (à saída dos QGBT(Quadros Gerais de Baixa Tensão) , nos quadros parciais dos edifícios, ou nos bornes de cada recetor com carga indutiva) foi a forma encontrada para resolver o problema.

Quando a aplicação é feita nos QGBTs, a penalização por consumo excessivo do consumidor é reduzida. Contudo, existe sempre uma potência reativa a circular, mantendo as perdas por efeito de Joule.

A compensação nos quadros parciais diminui o excesso de energia reativa a circular, otimizando-se a instalação. Neste tipo de compensação, é possível reduzir também os efeitos de Joule, mas ainda se mantém muita energia reativa a circular pelos quadros intercalares e equipamentos receptores.

Na compensação individual, consegue-se otimizar por completo a utilização de energia reativa, isto porque o problema é combatido logo na fonte, reduzindo, inclusivamente, o sobreaquecimento.

## **2.6 Síntese**

Ao longo deste capítulo, foram investigados os problemas inerentes à operação do sistema elétrico. Verificou-se que os constrangimentos, que ocorrem ao nível da frequência e da tensão, podem dar origem a interrupções da rede ou ao seu mau funcionamento, entregando energia de má qualidade ao consumidor.

O novo paradigma, que vem sendo adotado na rede elétrica mundial, contempla a introdução de energia da forma dispersa, ou seja em qualquer ponto da rede. Apesar de todas as vantagens inerentes a uma produção deste tipo, esta introdução cria complicações adicionais do ponto de vista da qualidade energética. Por este motivo, há a necessidade de desenvolver as técnicas adequadas ao novo paradigma.

O próximo capítulo, irá, exatamente, sensibilizar para a nova geração produtora energética.

## Capítulo 3

# Produção distribuída no contexto atual

Este capítulo começará por definir o paradigma atual da distribuição e transporte da energia, confrontando-o com o anterior. Depois passar-se-á à elencagem e análise das tecnologias existentes para a exploração da energia eólica e da energia solar. Finalmente, far-se-á uma abordagem superficial sobre a eletrónica de potência utilizada para converter a energia contínua produzida, em alternada para permitir a sua integração na rede de energia.

### 3.1 Introdução

É hoje um desafio corrente para as entidades, tanto produtoras como distribuidoras, manter a energia a fluir com os parâmetros de qualidade que se pretendem. Com o aumento exponencial da procura pela energia urge tratar os problemas de controlo, tanto da frequência da rede como da tensão e corrente. Para estes problemas, contribui, como um fator determinante, uma produção descentralizada que muda todo o panorama de controlo da rede, pois a energia não flui, apenas, de montante para jusante, mas tem também introduções de potência em qualquer ponto da mesma.[29]. Classifica-se como distribuída toda a produção de energia instalada em pontos a jusante dos grandes centros de produção. Habitualmente, as energias renováveis têm origem distribuída.

A crescente necessidade energética, aliada a um desafio ambiental cada vez mais exigente, tem motivado a procura de soluções no contexto global. A produção distribuída é uma realidade e entra diariamente nas casas dos consumidores. A energia produzida através dos recursos renováveis está em estado de expansão e o seu desenvolvimento é essencial de forma a ser capaz de, efetivamente, substituir os recursos energéticos não renováveis.

### 3.2 Paradigma convencional e atual

Os sistemas convencionais, sem produção distribuída, tinham uma organização muito bem definida, de montante para jusante, tal como indica a figura 3.1. Como se pode verificar, os centros produtores enviavam toda a energia necessária para as cargas, e o controlo era feito de

forma centralizada. Grande parte do sistema elétrico não foi construído para suportar a integração de PDIS (Produções dispersas), pelo que, hoje em dia, ou se reestrutura a rede, ou então, as fontes de PDIS têm de se adaptar ao sistema.

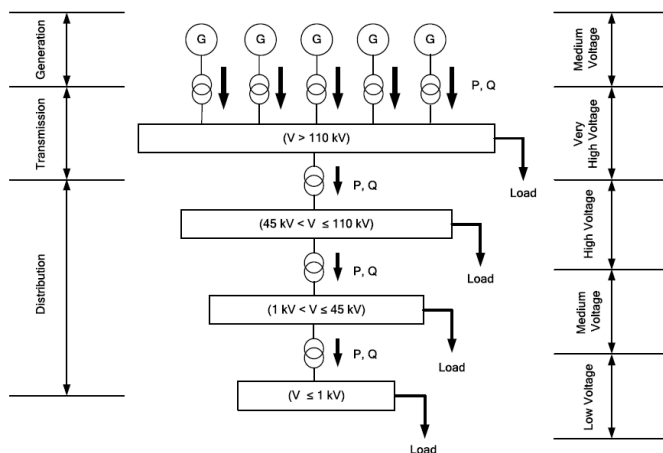


Figura 3.1: Esquema tradicional de distribuição de energia [5]

Na atualidade, verifica-se que as PDIS entram em qualquer ponto da rede e, por vezes, em locais com baixo consumo, enviando a energia para montante. A figura 3.2 exemplifica este contexto. Um grande problema desta configuração reside na dificuldade do controlo deste tipo de produção, pois, ou a energia é consumida localmente ou, por vezes, a fonte terá de ser mesmo desligada.

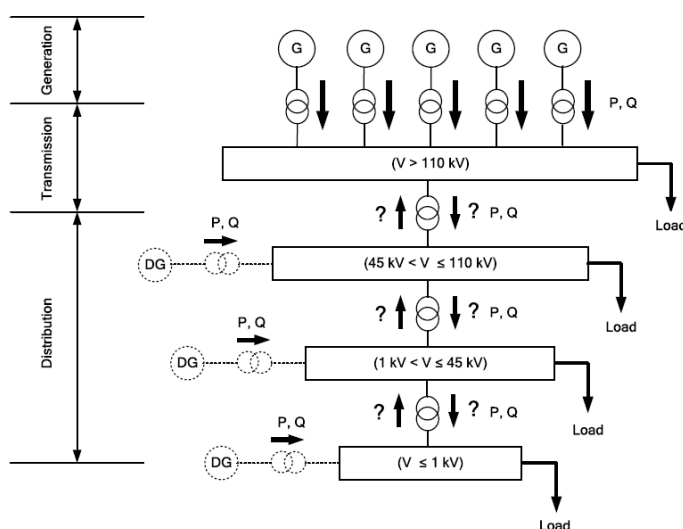


Figura 3.2: Esquema com PDIS integrada na rede [5]

Portanto, falamos de uma rede complexa em que a sua topologia está constantemente a variar, as fases têm sempre um ligeiro desequilíbrio entre si, as tensões superam, muitas vezes, os limites

no barramento local e o controlo é localizado.

Grande parte das pessoas não está consciencializada de tal mudança de paradigma até porque é bastante difícil de explicar. A verdade é que se chega, hoje, a um ponto em que, para além das energias renováveis serem boas para o ambiente, também começam a ser verdadeiramente rentáveis, o que assusta os grandes produtores. No entanto, para que a sua competitividade continue a aumentar é necessário um trabalho conjunto de todas as entidades envolvidas para se progredir no sentido da evolução ao nível de sistemas de controlo que sejam mais compactos e inteligentes e com melhores inversores elétricos. Por outro lado, o futuro traz ainda novas perspetivas de comercialização muito mais competitivas, pois o próprio consumidor ganhará mais importância ao nível da compra e venda da energia que o mesmo pode produzir em sua casa. Cada consumidor/produtor constituirá uma peça da sua própria microrrede. Este conceito não será abordado nesta dissertação, mas certamente tem elevada relevância no contexto da produção descentralizada e será um termo corrente e presente, no quotidiano das pessoas, num futuro muito próximo.

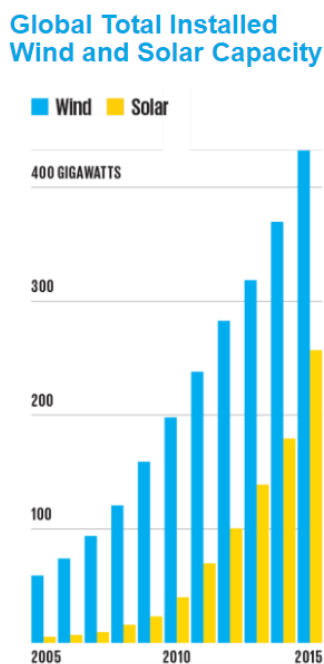


Figura 3.3: Capacidade eólica(azul) e solar (amarelo) [6]

A figura 3.3 mostra a potência global instalada de energia eólica e solar que representa apenas 10 % da capacidade mundial instalada representa 4 % da produção. Estes números mostram que ainda existe um grande caminho a percorrer até que a produção descentralizada seja uma forma de energia dominante. Para além disso, percebe-se que existe uma discrepância entre a potência instalada e o que está a produzir. Na verdade, muitas centrais eólicas e solares não têm uma rede preparada para receber toda a energia produzida, além disso, o fraco desenvolvimento de tecnologias de armazenamento leva a que muita da energia se deite, literalmente, fora, e ainda que

algumas centrais, consideradas para esta estatística, estão ainda a finalizar a sua construção, mas que já contam para a capacidade instalada.

O caso português é um excelente exemplo. Com efeito, constata-se um elevado crescimento a nível da utilização deste tipo de soluções, existem bastantes zonas ventosas e há também elevado número de horas anuais de sol, condições naturais que motivam o investimento nestas formas de energia. No ano de 2016, pela primeira vez, as exportações de eletricidade ultrapassaram as importações, gerando um excedente comercial de 170 milhões de euros, e a perspetiva para 2017, também é animadora. A interligação para Marrocos parece ser uma realidade num futuro próximo. A contribuir para este crescimento está a energia eólica que aumentou 7% e a fotovoltaica que aumentou 2,8 %. [30].

Contudo, esta integração tem os seus problemas, alguns dos quais já foram referenciados no capítulo 2. Para além desses, acrescente-se que a energia, que é produzida, não está preparada para entrar diretamente na rede e, por isso, necessita de ser convertida através de eletrónica de potência.

### 3.3 Energia eólica



Figura 3.4: [7]

A energia eólica é um recurso energético dos mais antigos de que há memória. Muito antes da utilização do carvão como recurso energético, já os moinhos de vento serviam para fazer a moagem de cereais e também para movimentar a água para cima de forma a irrigar as plantações. No entanto, a sua aplicação no contexto atual energético, de forma viável, data de meados de 1970 quando se verificaram os avanços tecnológicos suficientes para ser sustentável.

No contexto global, a instalação eólica corresponde a apenas 1,8% da necessidade energética mundial. Até 2050, as perspetivas mais ambiciosas apontam para um crescimento até aos 20 %. Em termos nacionais, instalação eólica é, já, bastante perceptível na paisagem. A Europa, no geral, tem seguido nesta direção, e, com os avanços contínuos da tecnologia, começa a ser, hoje, rentável o investimento e a sua exploração. Os apoios governamentais, outrora essenciais para o desenvolvimento da tecnologia, começam, agora, a ser dispensáveis [8].



Segundo estudos baseados em algumas suposições, do ponto de vista do desenvolvimento da tecnologia e desvalorizando também alguns constrangimentos, como por exemplo a acessibilidade dos espaços, o potencial energético oscilaria entre os 19 400 TWh e os 125 000 TWh por ano. Isto representa de 1 a 8 vezes a produção mundial em 2016. De qualquer das formas, fica evidente que numa situação ótima poderíamos viver apenas da produção deste recurso. Naturalmente, as questões sociais e o impacto ambiental serão fatores que irão condicionar estes valores, que, ainda assim, são já muito relevantes. Acresce referir, no entanto, que este cenário só seria possível, nestes moldes, se as necessidades energéticas fossem iguais em qualquer parte do globo e se o potencial energético também o fosse, devido às dificuldades no transporte. A figura 3.5 mostra a distribuição do vento em termos globais. Outro dos condicionalismos, não menos importante e a ter em atenção, relaciona-se com as questões climáticas que podem alterar a distribuição do vento.[8]

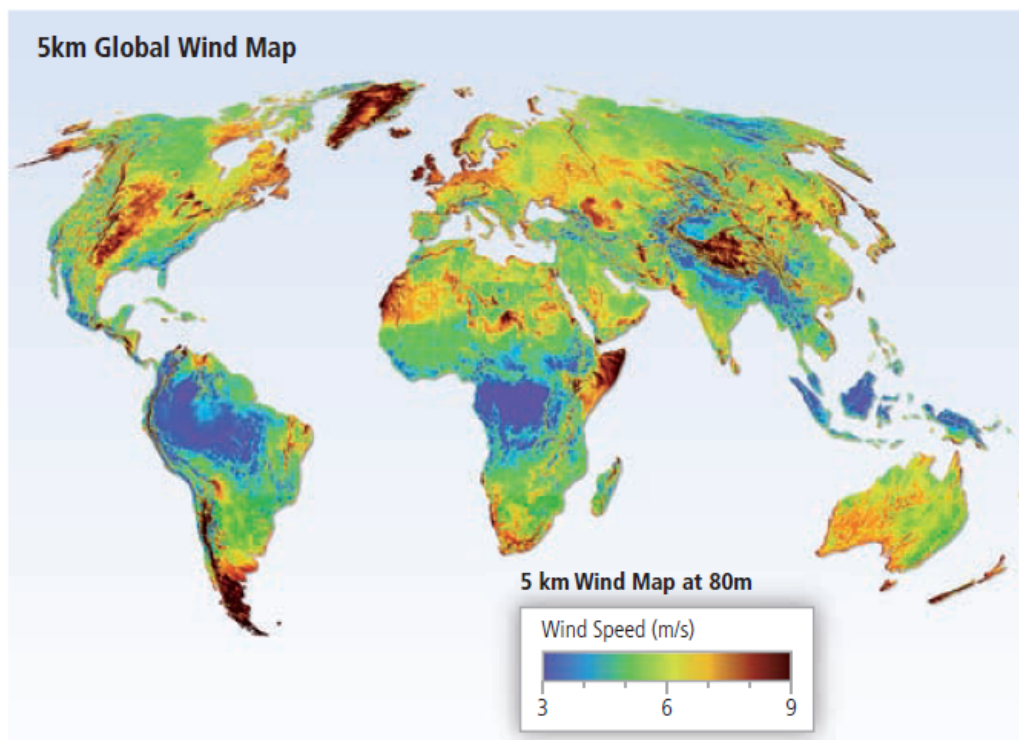


Figura 3.5: Distribuição mundial do ventos médios por ano [8]

Relativamente à estrutura do "aparelho" em si, as modernas turbinas evoluíram, de pequenas máquinas de cerca de 17 metros, para autênticos "monstros" de 150 metros de altura (desde a base até ao centro). Hoje, os rotores podem atingir diâmetros de mais de 150 metros, sendo capazes de produzir 216 000 Kwh num dia [31].

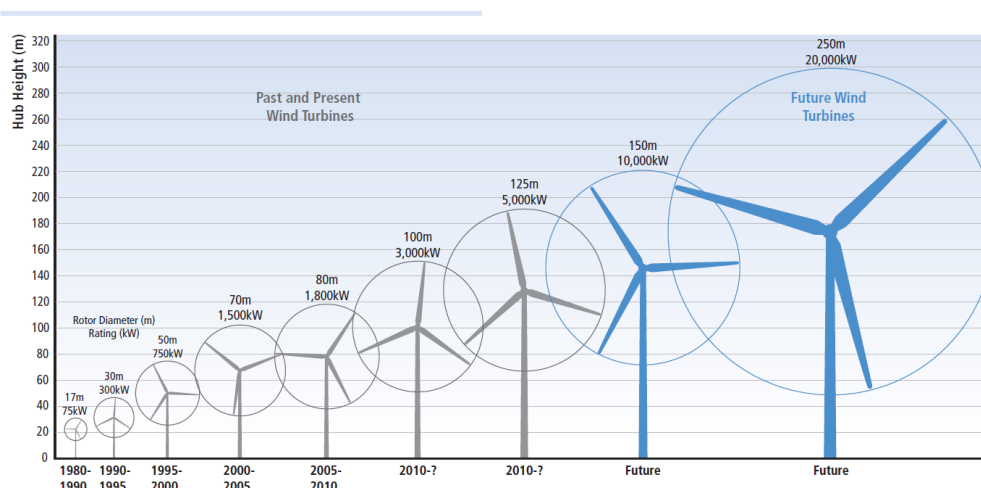


Figura 3.6: Dimensão cronológica das turbinas [8]

Os termos "Offshore" e "Onshore" dizem respeito ao tipo de localização para se instalarem as turbinas, especificamente, o primeiro termo refere-se às instalações no mar e o segundo às feitas em terra. A energia eólica "Offshore", apesar de utopicamente parecer ser a ideal, é a que apresenta mais obstáculos ao seu desenvolvimento, sobretudo devido aos seus elevados custos de manutenção, de instalação e de logística. Sublinhe-se, no entanto, que é a que permite a instalação de parques maiores, com turbinas mais altas e potentes e também com maior facilidade de transporte da eletricidade produzida. Para que a sua sustentabilidade e a qualidade da energia produzida sejam asseguradas é ainda fundamental que, acoplado, esteja um sistema de conversão de energia robusto.

### 3.3.1 Integração Eólica no SEE

A introdução de energia eólica no SEE, para além de gerar energia, gera também bastantes problemas para a rede no que a ela concerne. A adaptação da rede a este contexto depende muito da magnitude da potência produzida. Se for de baixa magnitude, terá um impacto mais reduzido na frequência da rede, devido à elevada inércia que a mesma tem, todavia se for uma instalação de grande potência, isso pode implicar uma reestruturação da rede elétrica a montante.

O objetivo de qualquer produtor energético consiste em alimentar os consumidores alvo. Para o poderem fazer, os produtores de energia eólica têm de saber responder a um grande desafio que passa pelas constantes flutuações do vento. Obviamente, que cada sistema elétrico é um caso concreto e por isso com respostas concretas. No geral, o objetivo comum a qualquer produtor é encontrar resposta para os seguintes problemas[9]:

- Manter a tensão de referência para todos os consumidores;
- Equilibrar de forma rápida e eficaz a produção com o consumo.

O que, no fundo, representam os problemas habituais de qualquer tipo de produção energética.

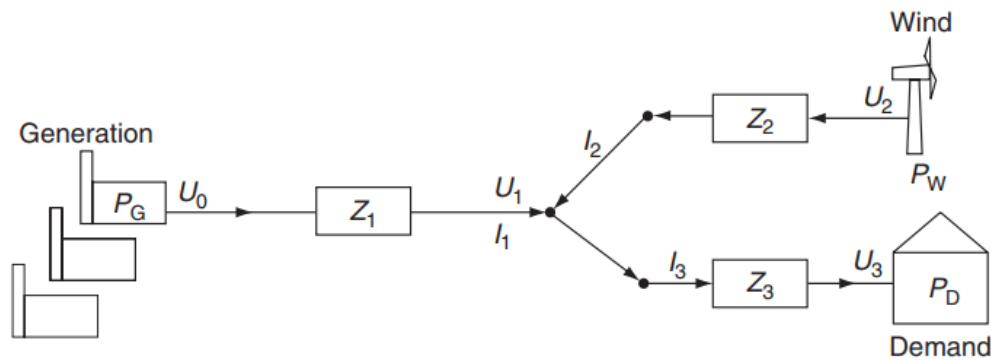


Figura 3.7: Esquema ilustrativo de um SEE [9]

$$P_G = P_D + P_L - P_W \quad (3.1)$$

Onde  $P_G$  é a produção requerida por parte da rede;  $P_D$  é a potência consumida;  $P_L$  são as Perdas na rede de transporte  $Z_1$ - $Z_3$  e  $P_W$  é a produção do recurso renovável.

A figura 3.7, assim como a equação 3.1, são esquemas que representam, de forma muito simplificada, qualquer sistema elétrico com produção distribuída, quer seja para pequenos períodos de tempo, quer para os mais longos. Qualquer alteração de alguma variável da equação implica um balanceamento por parte das outras variáveis.

Do ponto de vista do consumidor, definem-se 3 exigências aos operadores da rede, a saber:

1. A tensão que chega às suas tomadas deve respeitar os limites estabelecidos (normalmente 10% dos 230 V);
2. O consumidor deve ter acesso à energia que contratou em qualquer momento;
3. O preço que é pago por KWh deve ser um preço justo.

Do ponto de vista do produtor de energia eólica, definem-se, também, 3 exigências:

1. As turbinas eólicas são projetadas para trabalhar com uma determinada gama de tensão que não pode ultrapassar a tolerância de 10 %;
2. A energia produzida é obrigatoriamente vendida no mercado e absorvida na rede;
3. O custo da energia de trabalho das turbinas deve ser paga segundo um critério de qualidade/preço.

O desafio da rede é responder às exigências, tanto dos consumidores, como dos produtores de energia renovável, de forma económica mesmo numa situação de elevada carga a alimentar.

Utilizando novamente como apoio a figura 3.7 assim como as equações básicas da Lei de Ohm

$$R = \frac{U}{I} \quad (3.2)$$

e da potência,

$$P = U * I \quad (3.3)$$

Seguidamente, explicar-se-ão, com mais detalhe, o impacto e os desafios da introdução de energia eólica na rede.

### 3.3.1.1 Tensão junto ao consumidor

Num cenário em que os geradores eólicos estão desligados e que a tensão  $U_0$  se mantém constante pelo gerador (ou seja, estamos perante um gerador de potência infinita), observamos que se a carga do consumidor  $P_D$  variar, isso significa que a corrente  $I_3 = I_1$  tem de variar também para manter o equilíbrio da equação 3.1. Ou seja, baixa a corrente se a carga aumenta e aumenta a corrente se diminuir a carga como se verifica pela aplicação da equação 3.2. Assim, quanto maior for a impedância das linhas  $Z_1$  e  $Z_3$  (linhas longas) maiores serão as quedas de tensão em  $U_3$ . Portanto, é necessário evitar que existam muitas perdas nas linhas de forma a que as quedas de tensão não sejam demasiadas. Para isso, é necessário ter uma rede forte e robusta e fazer uso das tomadas dos transformadores junto às cargas de forma a ajustar o valor de tensão em  $U_3$  para o pretendido. Perante um outro cenário de entrada da produção de energia eólica, verifica-se que a corrente  $I_2$  varia consoante varia a produção, no entanto,  $I_1$  varia também, alterando a queda de tensão registada em  $Z_1$ . Além disso, a tensão em  $U_1$  vai também alterar-se e, dependendo do valor de  $Z_1$ , isso poderá ter um efeito mais ou menos influente em  $U_3$ . Portanto, quanto mais perto estiver um consumidor de uma produção eólica, maior é a influência dessa produção na sua tensão recebida (causa situações de aumento excessivo da tensão). Para evitar problemas para o consumidor que estiver muito perto das centrais eólicas, é aconselhável aplicar um controlo local sobre as turbinas eólicas junto a  $U_2$ , assim como se aconselha a reestruturação da rede e/ou aplicar transformadores controláveis e bancos de condensadores.

### 3.3.1.2 Tensão junto à turbina eólica

A tensão em  $U_2$  também depende de  $P_W$ ,  $P_D$  e das cargas  $Z_1$ ,  $Z_2$ . A carga  $Z_2$  tem aqui a influência mais determinante, tendo em conta que é a que produz a queda de tensão daquela produção e que pode ser necessário ser regulada por um transformador controlável para garantir a tensão desejável em  $U_1$ . Na realidade, esta situação pode dever-se ao facto dos geradores eólicos estarem muito longe dos consumidores, devendo por isso aplicar-se um transformador regulável no ponto  $U_2$ .

### 3.3.1.3 Garantir a potência necessária em qualquer altura

Para cumprir este requisito, exige-se que a rede consiga equilibrar a frequência da forma mais rápida que lhe for possível de forma a não desconectar os consumidores. As energias renováveis podem ter mais ou menos impacto na oscilação de frequência, dependendo da sua influência no nó onde são introduzidas e da inércia da rede. Se a rede tiver pouca inércia, inclusive se funcionar

como rede isolada, a introdução eólica trará maiores impactos na oscilação da frequência, sendo necessário aplicar metodologias de controlo apropriadas.

#### **3.3.1.4 Disponibilidade da rede receber toda a energia produzida**

Como já foi referido, a produção em regime especial, em Portugal, que inclui a produção renovável, tem a obrigatoriedade de ser vendida na totalidade à rede. No entanto, é necessário que a mesma esteja preparada para a receber, pois, de outro modo, existirão congestionamentos nas linhas e, como consequência, interrupções de alimentação das cargas, assim como problemas críticos de abaixamentos de tensão.

#### **3.3.1.5 Contexto económico para o consumidor e fiabilidade da rede**

Idealmente, o sistema elétrico não deveria ter falhas, deveria ser 100% fiável, mas nenhum sistema o consegue, porque uma fiabilidade maior implica fazer avultados investimentos na rede. Perante esta evidência, as empresas de transporte e distribuição admitem as suas falhas, compensando os consumidores nas suas faturas relativamente ao número de falhas por ano. Obviamente que os cálculos são feitos de forma a que seja encontrada a solução mais barata do ponto de vista da fiabilidade/remunerações a pagar ao consumidor. Portanto, é aceitável, de vez em quando, desconectar os consumidores em vez de fazer esses avultados investimentos na rede. Porém, antes de proceder a um possível investimento dever-se-á atender ao organograma da figura 3.8

Uma rede bem dimensionada possuirá sempre várias alternativas de exploração. Assim, de acordo com as características específicas de cada configuração do sistema de produção e o nível de carga, o objetivo é determinar qual o caminho de distribuição mais adequado, tendo em atenção os custos de exploração e a qualidade de serviço.

Para além disto, é necessário garantir que o sistema tem reservas energéticas suficientes para alimentar os consumidores em caso de falha numa central, porque essas falhas não são admissíveis. A rede tem de ter soluções alternativas para alimentar os consumidores, ou seja, deve ser redundante.

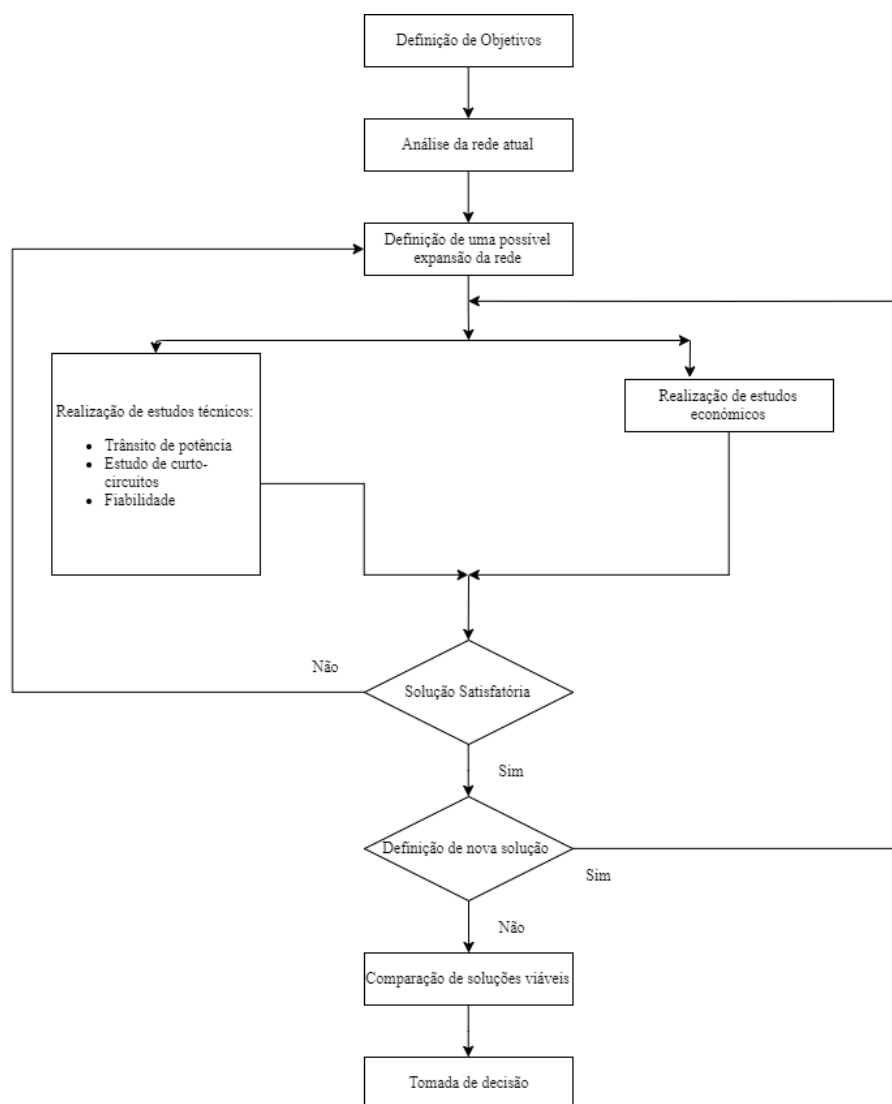


Figura 3.8: Organograma para avaliar viabilidade de investimentos na rede

### 3.3.1.6 Fiabilidade do sistema com a entrada de PDIS

No contexto da integração de energia distribuída, a eólica, em concreto, tem sido apontada como uma forma de aumentar a fiabilidade dos sistemas, isto porque é capaz de suprir as necessidades quando centrais térmicas e hidroelétricas não estão a produzir o suficiente. Consequentemente, a instalação de centrais eólicas reduz a necessidade de se recorrer às grandes centrais mais a montante do SEE. No entanto, é sempre necessário compreender que a integração de PDIS na rede traz custos adicionais. Usualmente, as centrais eólicas estão relativamente longe das habitações e precisam de um sistema de transporte e, como já se verificou, linhas longas trazem mais quedas de tensão, portanto, também mais equipamento de controlo e mais investimento. Ora, é a este equilíbrio entre fiabilidade e economia que se deve atender quando se instalam unidades de

energia eólica. Em suma, deve-se sempre proceder a um estudo detalhado das necessidades, em consonância com a fiabilidade pretendida.

### 3.3.2 Tecnologias existentes

A aplicabilidade desta forma de recolher energia necessita de pás aerodinâmicas e também turbinas eficazes, e estas devem ter, tanto quanto possível, uma boa capacidade de controlo de produção. Historicamente, existem e são utilizados 2 principais tipos de turbinas eólicas que irão ser descritas nos próximos sub-capítulos.

#### 3.3.2.1 Velocidade Fixa

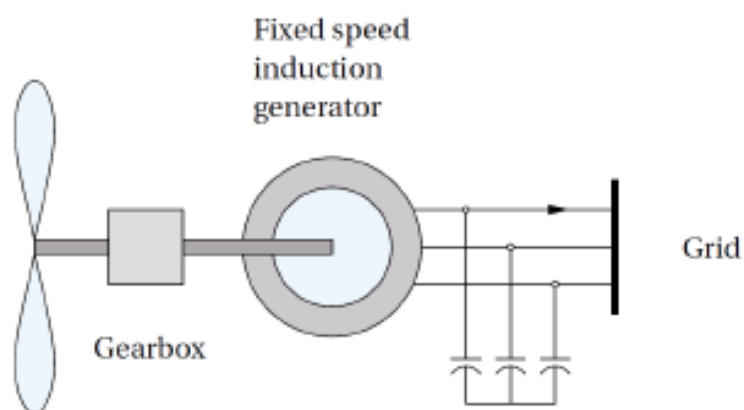


Figura 3.9: Esquema de uma turbina de velocidade fixa[10]

A figura 3.9 representa um esquema de uma turbina de velocidade fixa com rotor em gaiola de esquilo. O gerador está diretamente ligado à rede. Este esquema mostra que é necessária uma bateria de condensadores para alimentar o circuito magnético com energia reativa. A caixa de velocidades está colocada de forma a acoplar a baixa velocidade da turbina com a alta velocidade do rotor do gerador. Esta configuração é simples, robusta e barata e foi muito usada ao longo dos anos 80 e 90. No entanto, o arranque desta turbina não é assistido, o que inviabiliza o seu controlo durante a sequência de ligação à rede o que se traduz numa desvantagem. Outra das desvantagens prende-se com o risco de perda de sincronismo caso entre em velocidades demasiado elevadas, aumentando perigosamente o consumo de reativa o que poderá causar danos físicos nos componentes ou até potenciais catástrofes. Para impedir tal ocorrência, as turbinas são desligadas a partir de certa velocidade do vento.

#### 3.3.2.2 Velocidade Variável

A turbina de velocidade variável consiste num conversor que é acoplado ao estator do gerador como mostra a figura 3.10. A turbina eólica consegue um momento linear constante onde as

flutuações do vento são absorvidas, alterando a velocidade do gerador. Este tipo de tecnologia melhora a qualidade da energia produzida, aumenta a capacidade de absorção de energia e reduz o stress mecânico aplicado aos componentes. No entanto, a necessidade de aplicar mais componentes complica a configuração elétrica do sistema, elevando o custo do mesmo e aumentando o transiente distorçor introduzido na rede.

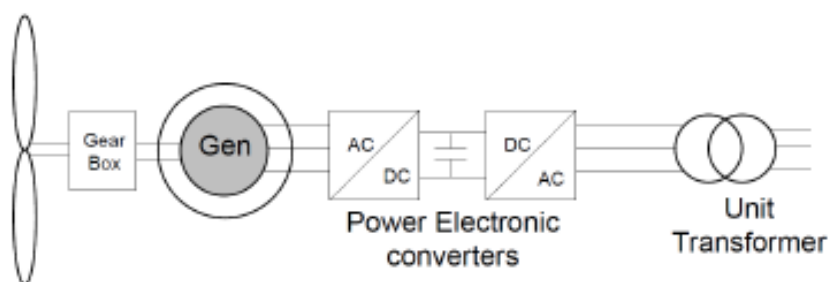


Figura 3.10: Esquema de uma turbina de velocidade variável [10]

A tecnologia mais recente, e amplamente utilizada, é a "Doubly Fed Induction Generator" (DFIG), cujo esquema ilustrativo é representado na figura 3.11. Neste caso, o motor de indução faz rodar o seu rotor, produzindo o campo elétrico necessário à existência da corrente. O estator está, depois, diretamente ligado à rede, enquanto que o rotor tem acoplado o sistema de conversão que recebe as informações da rede em sistema de malha fechada. Desta forma, o conversor eletrónico controla a corrente de indução a alimentar o rotor e, conseqüentemente, regula o campo eletromagnético e, por sua vez, a tensão de saída.

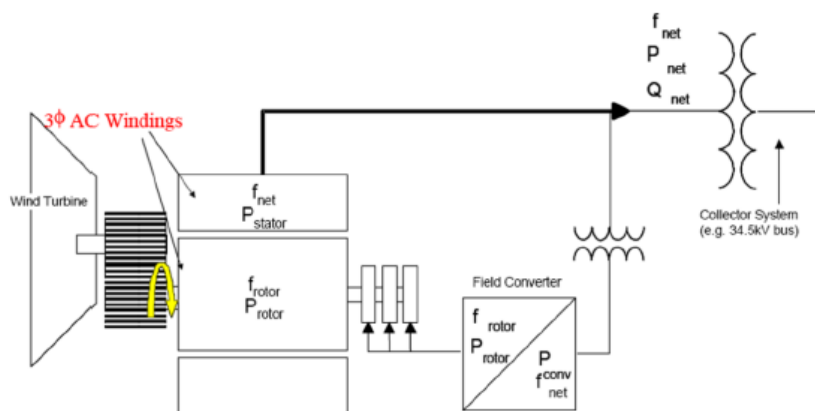


Figura 3.11: "Doubly FED Induction Generator"esquema[11]



### 3.3.3 Tecnologias inovadoras

As rápidas inovações tecnológicas, que as turbinas eólicas têm sofrido, fazem com que esta energia seja líder de produção de energia renovável a nível mundial (excluindo hídricas), já que se trata da energia renovável com o mais rápido crescimento.

Apresentar-se-ão, em seguida, algumas das tecnologias que surgiram durante o ano de 2016 e início de 2017.

1. **Turbina tufão**, inventada por Atsushi Shimizu, este modelo foi criado para suportar tempestades e recolher a energia que elas transportam. Segundo alguns estudos, a suficiente para alimentar o Japão durante 50 anos. O problema prende-se com o armazenamento dessa energia[12].

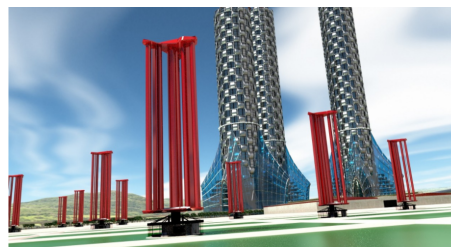


Figura 3.12: Turbina tufão [12]

2. **Turbina híbrida**, trata-se de uma turbina que também produz energia sem ter vento através do aproveitamento da energia hídrica. Existem também projetos que combinam uma turbina de gás comprimido na base que funciona a gás natural ou biogás [13].

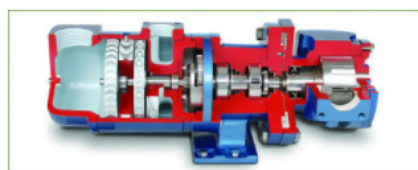


Figura 3.13: Gerador de uma turbina híbrida [13]

3. **Turbinas eólicas flutuantes com hélio**, neste caso, as ventoinhas, em vez de serem colocadas no solo ou no mar, como é habitual fazer-se, encontram-se no céu onde o vento se move mais rapidamente. Além da sua aplicação contextual, pode também albergar sistemas de transmissão de wi-fi e de redes móveis, ou colocar sensores meteorológicos [14]. A primeira ventoinha eólica deste tipo foi aplicada no Alasca.



Figura 3.14: Turbina eólica flutuante [14]

4. **Torre de túnel de vento**, este modelo consegue produzir 600 vezes mais energia do que as turbinas eólicas tradicionais. Pode funcionar em condições de vento fraco, já que, ao ser empurrado para dentro, é comprimido o que acelera sua velocidade. A ausência de lâminas torna este modelo menos caro do que o das turbinas eólicas tradicionais, tornando-se também uma proteção adicional para os pássaros [15].



Figura 3.15: Plano cortado do esquema de uma torre de túnel de vento [15]

### 3.4 Energia solar

O calor emitido pelo Sol e a sua radiação produzem aquilo a que chamamos a energia solar. Facilmente se compreende que o Sol é a fonte de energia mais potente do nosso sistema solar. Desde os primórdios, que o ser humano tenta fazer uso desta energia e aproveitá-la.

A Terra recebe mais energia numa hora do que aquela que é consumida no mundo inteiro durante 1 ano. Esta energia chega-nos através de um processo chamado fusão nuclear. Nesta reação, 4 átomos de hidrogénio combinam-se, criando o hélio. Durante este processo, é libertada energia que é enviada para todas as direções.

Por toda a Europa, tem-se assistido, à utilização desta tecnologia a um ritmo de crescimento muito acentuado. Para esse crescimento, têm contribuído países muito influentes, europeus ou não, tais como a Alemanha, a China, o Japão, os Estados Unidos (ver figura3.16. No final de 2016, a instalação global ultrapassou os 300 GW, comparado com os 40GW em 2010. Portanto, os valores quase que foram octuplicados em apenas 4 anos. Todavia, prevê-se que tal crescimento venha abrandar devido à redução de incentivos por parte das entidades governamentais. [16].

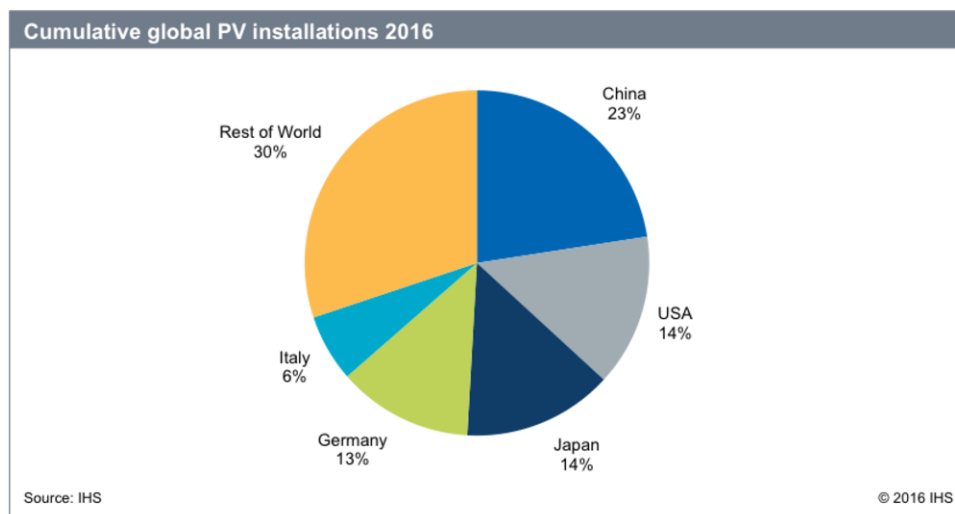


Figura 3.16: Distribuição Mundial da instalação solar [16]

Atualmente, numa Europa motivada pela iniciativa 20-20-20, o contexto renovável sai privilegiado no combate às emissões de dióxido de carbono. Portugal tem como meta chegar aos 59% de produção apenas renovável até 2020. O cumprimento desta meta pode passar, também, pelo aumento para os 700 MW de potência de origem solar instalada. Para isso, contribuirão os parques instalados em Brinches, no concelho de Serpa com 52 mil painéis fotovoltaicos e com uma potência total de 11MW, a central fotovoltaica da Amareleja com 46,41 MW, o parque solar de Almodôvar com 2,15 MW, a central solar de Ferreira do Alentejo com 12MW, assim como muitos outros parques de dimensão menor e as microproduções dos próprios consumidores/produtores [17].

Portugal tem zonas bastante adequadas para a instalação de tais parques como se pode verificar na figura 3.17

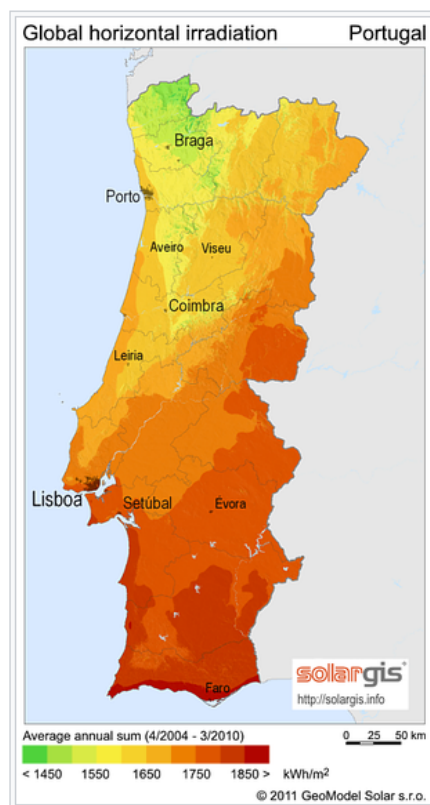


Figura 3.17: Carta da radiação solar em Portugal continental [17]

### 3.4.1 Integração Solar no SEE

A integração de energia solar no SEE padece de muitas dificuldades no que diz respeito à sua integração na rede. A elevada sensibilidade das células fotovoltaicas faz com que, do total da energia elétrica irradiada, 3 % fique nos contactos frontais, 23 % da radiação não tenha potência suficiente para excitar os eletrões da célula, 32 % é a energia de gama de radiação não absorvível pela célula, 20 % é retido pelo gradiente elétrico numa célula e ainda 0,5 % correspondem a perdas ohmicas. Sobre, portanto, entre 13 a 19 % de energia elétrica utilizável. Também, em termos externos, a irradiação solar não é um valor constante. A alternância entre períodos de Sol e de nuvens faz com que a potência produzida pela produção solar não se traduza num valor constante durante o dia, sendo assim, são necessários inversores que façam a conversão do sinal contínuo, em alternado de forma a ser introduzido na rede. Perante tais constrangimentos, a rede tem muito mais dificuldade em controlar a entrada da energia no seu sistema.

O impacto da produção descentralizada fotovoltaica pode ser descrito nos seguintes itens:

- Aumento da tensão nos barramentos onde é introduzida;

- Problemas de sobrecarga nas cargas mais perto dos locais de penetração;
- Maiores necessidades de manobra das tomadas dos transformadores e dos bancos de condensadores;
- Existência de uma grande flutuação de potência reativa, motivada pela necessidade de manobra dos condensadores;
- Constante alteração da tensão do barramento local, devido à flutuação da potência produzida;
- Problemas de funcionamento dos equipamentos de proteção contra sobretensões e sobrecorrentes;
- Aumento das perdas elétricas, provocadas pelo trânsito de potências inverso.

Estas condicionantes levam à diminuição da qualidade da energia e são, tanto mais relevantes, quanto maior for o nível de penetração dispersa no sistema. Os estudos que vierem a ser feitos devem ter em conta qual é esse nível, para que se possa aplicar uma solução de controlo adequada, sendo que é diferente se se tratar de uma microprodução ou de uma grande central solar.



Figura 3.18: [18]

### 3.4.2 Tecnologias existentes

O crescimento exponencial das instalações solares tem também associada uma evolução constante das tecnologias com que se faz a montagem dos painéis em si. De uma forma geral, é academicamente aceite que podemos dividir os tipos de painéis existentes em 4 gerações. A primeira, que utiliza a sílica mono e policristalina, ainda ocupa cerca de 90 % do mercado. A segunda, entrando já na tecnologia dos painéis que utilizam uma configuração mais fina e inorgânica. A terceira é um pouco mais ambígua, embora haja a tendência de a incluir nas tecnologias orgânicas. E finalmente, a quarta, na qual se incluem as tecnologias ainda em desenvolvimento, as chamadas

de tecnologias concentradas. A figura 3.19 contrapõe a evolução cronológica destas gerações ao rendimento de cada uma delas.

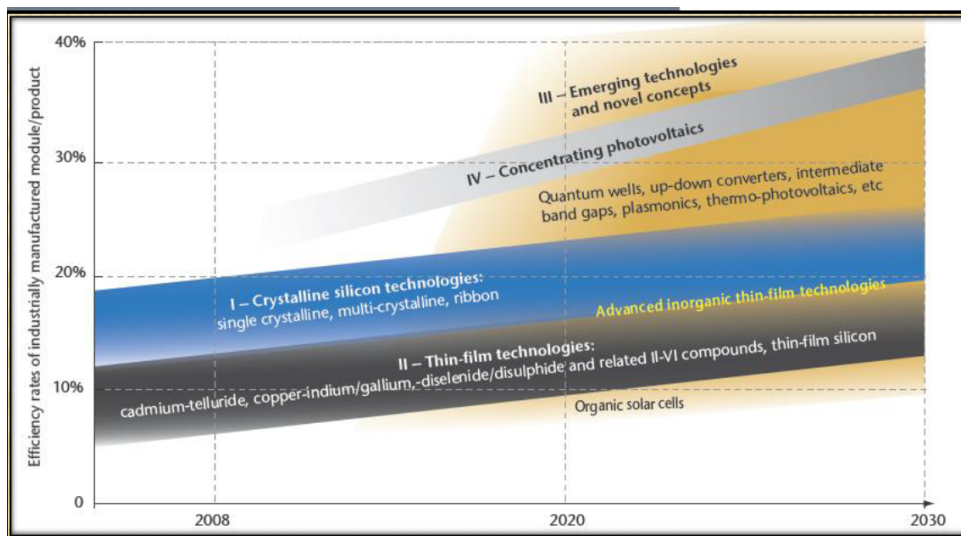


Figura 3.19: Evolução Vs Eficiência [19]

### 3.4.2.1 1ª Geração

Neste grupo, incluem-se as células monocristalinas, as policristalinas e as amorfas [32].

- As células monocristalinas de silício são as que apresentam um rendimento mais elevado que vai dos 16 aos 23% em condições muito favoráveis. O seu método de fabrico é bastante complexo e meticuloso, dado necessitar de cristais monocristalinos em estado muito puro o que encarece a sua produção;
- As células policristalinas, apesar de terem um processo de fabrico similar às monocristalinas, exigem menos rigor na sua construção, o que as torna mais baratas, ainda que à custa de alguma ineficiência, no máximo 12,5% à escala industrial;
- As células de silício amorfo, tal como o nome indica, apresentam um alto grau de desordem na configuração dos átomos, conseguem absorver radiação na faixa do visível e podem ser fabricadas mediante deposição de diversos tipos de substratos, sendo uma boa aposta para sistemas que requeiram um baixo custo. No entanto, a sua baixa eficiência de conversão e a baixa fiabilidade dos seus componentes reduzem a sua viabilidade.

### 3.4.2.2 2ª Geração

A segunda geração de materiais de fotovoltaicos está baseada no uso de filmes finos semicondutores. Desta forma, reduz-se a quantidade de material necessário à sua produção, assim como o preço. A eficiência deste tipo de célula é menor em relação às de silício. No entanto, dado o seu menor preço e flexibilidade na aplicação, estas soluções podem ser vantajosas [32].

- **Selenete de cobre e índio (CIS)**, este material é um semicondutor escolhido devido à sua elevada taxa de absorção fotoelétrica e facilidade de construção. Misturado com sulfureto de cádmio, é possível obter uma célula solar. Esta tecnologia é promissora, pois os seus componentes, exceto o índio, são fáceis de obter e, apesar de conter cádmio, o seu composto não é tóxico. Ao contrário das células de silício amorfo, este material tem bastante durabilidade e resistência, com eficiências na ordem dos 7 a 13 %;
- **Telureto de Cádmio**, este composto é um material bastante promissor nas tecnologias de filme fino. Tem uma elevada absorção e boas propriedades de transporte da energia, assim como uma fácil metodologia produtiva. Teoricamente, é o material com maior potência e rendimento na ordem dos 25%. No entanto, em laboratório, as eficiências não têm ultrapassado os 15% e o seu rendimento típico, na prática, situa-se ligeiramente acima dos 10%. As maiores dificuldades, que este material enfrenta, prendem-se com a fraca durabilidade do sistema e com o problema da aplicação de contactos com baixa resistência elétrica e que, ao mesmo tempo, não se degradem com o tempo. Em termos económicos, a sua produção comercial é bastante atenuada, por causa do cádmio apresentar uma elevada toxicidade;
- **Arseniato de Gálio**, esta é a tecnologia mais eficiente que existe, chegando a 26%, tanto em laboratório, como na prática. Este composto tem uma elevada taxa de absorção fotoelétrica e não baixa o seu rendimento perante aumentos de temperatura. A sua produção é extremamente cara, o que pode inviabilizar a sua utilização em contextos com fins comerciais. É na atividade espacial, onde é realmente necessária uma elevada qualidade, e onde os custos são menos importantes, que este composto é utilizado.

#### 3.4.2.3 3ª Geração

Uma definição possível para a terceira geração de células solares trata-se de células que permitem uma utilização mais eficiente da luz solar, do que as células baseadas num único "band-gap" eletrónico. De forma geral, a terceira geração deve ser altamente eficiente, possuir baixo custo por watt e utilizar materiais abundantes e de baixa toxicidade.

As células fotovoltaicas de terceira geração incluem as baseadas em materiais orgânicos OPV (Organic PhotoVoltaics) e aquelas que utilizam pontos quânticos PQs (Pontos quânticos). Estas células de terceira geração, embora ainda careçam de eficiência de conversão, exibem grande potencial e diversas vantagens sobre as tecnologias estabelecidas. Entre essas vantagens, destacam-se o processamento de baixo custo sobre grandes áreas, a possível semitransparência, a flexibilidade mecânica e o baixo peso. As aplicações destes dispositivos incluem equipamentos de baixa potência (eletrónica de consumo) e a integração em edificações, conhecida como BIPV (Building Integrated Photovoltaics).

O desenvolvimento destas tecnologias utiliza técnicas avançadas de síntese química para obter nanocristais semicondutores ou simplesmente pontos quânticos, que absorvam mais eficientemente os fótons da luz solar. PQs coloidais são minúsculos cristais que têm entre 1 e 10 nanómetros de diâmetro, aproximadamente o tamanho de 10 a 50 átomos. Devido à dimensão extremamente

pequena dos cristais, dominam efeitos de confinamento quântico. Ou seja, é possível controlar as propriedades de absorção da luz em função do tamanho e da composição do nanocristal.

#### 3.4.2.4 4ª Geração

A energia solar de 4ª geração é associada às tecnologias que recolhem a energia solar de forma concentrada. A CSP (concentrated solar energy) são sistemas que usam lentes ou espelhos para concentrar uma área grande de incidência solar numa área mais pequena. Existem 2 tipos de energia solar concentrada: a energia solar que é convertida em térmica e a energia solar que é convertida em eletricidade, existe ainda uma outra que faz ambas as tarefas. No que concerne à temática desta dissertação, o foco será apenas nas que transformam a energia solar em energia elétrica.

Apesar das tecnologias concentradas se incluírem na quarta geração, as primeiras pesquisas que permitirem concluir que é possível melhorar a quantidade de energia absorvida, por parte dos painéis fotovoltaicos, utilizando sistemas concentradores, datam de 1970 [33]. Era um sistema que utilizava uma lente Fresnel acrílica como foco apontada às células de silício para arrefecimento de água. As investigações continuaram até ao ano de 2006 quando, pela primeira vez, foi instalado pela empresa ISFO, em Puertollano, um parque com 3 MW de potência a fornecer a energia à rede elétrica [34].

A ideia inerente à concentração fotovoltaica passa pela substituição do material semicondutor, por um material refletor ou refrator, conforme seja mais económico. Com tal sistema ótico, é possível captar muito mais energia num espaço mais reduzido. Este tipo de centrais apresentam uma configuração de duplo eixo para possibilitar um máximo aproveitamento solar durante todo o dia, desde que os painéis sejam mantidos a uma temperatura moderada. Relativamente à sua eficiência, em 2009 foi atingido um máximo de 41,6 %, prevendo-se ser possível chegar aos 50 % num futuro próximo.

#### 3.4.3 Tecnologias Inovadoras

Naturalmente, com tanta investigação a ser levada a cabo, todos os anos aparecem novas formas de converter a luz solar. Nesta secção, serão enumeradas algumas:

1. **Os telhados solares**, o multimilionário, Elon Musk, criou uma metodologia produtiva de painéis adaptáveis aos telhados das casas comuns chamada "Tesla's sexy solar shingles". Trata-se de uma tecnologia bastante resistente aos agentes erosivos diários, como a chuva e o vento e que passa despercebida ao observador. O próprio dono da companhia Tesla assume que, embora menos eficientes do ponto de vista energético, estes painéis serão mais baratos do que as telhas habitualmente usadas. Certamente, um dos passos para chegar, por exemplo, aos automóveis totalmente revestidos por material solar [20].





Figura 3.20: Telhado solar [20]

2. **"Rayton Solar"**, esta "startup", sediada no estado da Califórnia, reclama ter criado uma nova metodologia que melhora o grau de pureza do silício utilizado na produção dos painéis. Para isso, utiliza um acelerador de partículas que empurra prótons contra uma placa de silício. Com aparelhos de precisão, é possível controlar a forma como os prótons são atirados, colocando-os de forma perfeita na placa. Quando a placa estiver perfeitamente carregada, esta é aquecida e é-lhe retirado um fino pedaço de silício com um elevado grau de pureza, o qual tem 90 % mais de pureza que o convencional utilizado. Ao ser aplicado nos painéis, estes aumentam em 25% a sua eficiência, reduzindo ainda os custos em 60 %.
3. **Pratos espelhados**, a companhia sueca Ripasso Energy diz converter 34 % da energia recebida com os painéis da figura 3.21, podendo produzir até 85 MWh de energia por ano, o equivalente à energia necessária para alimentar 24 casas em Portugal. [35]



Figura 3.21: Pratos espelhados 3.21

4. **Balões solares**, esta tecnologia conjuga as propriedades da CPV com um aspeto construtivo em forma de balão para maximizar a quantidade de energia concentrada. Utiliza parte da energia recolhida para alimentar uma "fuel cell" que converte a corrente em hidrogénio e mantém o balão no ar. Logicamente, estas células não têm o problema da nebulosidade, precisamente, porque o balão está acima dessa nebulosidade. À noite, o hidrogénio é recolhido pela "fuel cell" e convertido em carga, também entregue à rede, trazendo, ao mesmo tempo, o balão de volta ao chão.[21]

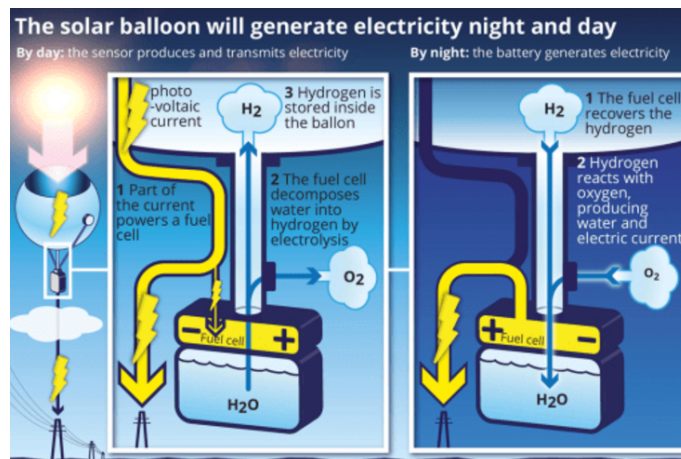


Figura 3.22: Balão Solar [21]

### 3.5 Síntese

O capítulo 3 focou-se no impacto das energias renováveis no contexto global, e na importância das mesmas na mudança de paradigma atual. Foi feito um levantamento do percurso histórico e futuro das energias renováveis mais importantes(excluindo a hídrica), dando-se a conhecer este mundo novo. Conclui-se também que uma introdução deste tipo de energias traz problemas adicionais ao nível do controlo da qualidade energética e sensibiliza para a cautela necessária antes da aplicação da energia produzida na rede global.

No próximo capítulo, far-se-á uma abordagem às possíveis soluções ou formas de mitigar o impacto das PDIS.

## Capítulo 4

# Mitigação dos problemas

A utilização generalizada de equipamentos com componente eletrónica elevada e a introdução crescente de energia da forma dispersa produzida pode contribuir, em grande parte, para deteriorar a QE dos utilizadores finais. É cada vez mais importante dar especial atenção à qualidade da energia que circula na rede, pois os equipamentos eletrónicos, presentes também nos circuitos de controlo dos conversores e inversores acoplados às produções eólicas e solares, são muito sensíveis ao sinal de entrada que recebem para executar as suas funções. Será curioso salientar que, os interfaces de potência baseados em eletrónica são uma parte do problema e ao mesmo tempo fazem parte da solução. São parte do problema, porque introduzem harmónicos na rede e são parte da solução, porque contribuem para ajudar na estabilização da rede, dando suporte direto à tensão e à frequência.

### 4.1 Soluções para melhorar a qualidade da energia

Existem algumas formas que ajudam a garantir uma melhor qualidade da energia tais como[3]:

- Desenhar e planear o equipamento eletrónico a aplicar em cada situação específica de forma a impedir que o sistema funcione incorretamente. As próprias entidades poluidoras (empresas, parques eólicos, parques solares, espaços de ensino, entre outros) devem ser sensibilizadas no sentido de utilizarem equipamento menos sensível às perturbações. Adicionalmente, essas entidades podem aplicar na sua rede interna bancos de condensadores que sejam capazes de fazer a alimentação de energia em caso de cavas de tensão. Normalmente, é a própria rede de distribuição que aplica este tipo de solução. É-lhes também possível adaptar os seus equipamentos de forma a que os mesmos se alimentem dos problemas de qualidade de energia, aplicando, por exemplo, um tipo de transformador "K factor" que limpa os harmónicos da rede, consumindo-os;
- Analisar os sintomas dos problemas de qualidade para determinar a sua causa e solução. É importante determinar a fonte dos problemas, pois assim é possível determinar a solução a aplicar;









































































- Identificar os equipamentos que estão a prejudicar a qualidade da rede e aplicar as soluções perto dos mesmos;
- Tratar dos sintomas dos problemas, utilizando equipamentos de condicionamento de potência. Estas são concebidas com filtros internos para isolar as tomadas individuais do aparelho conectado à rede e atuam de forma a eliminar interferências entre os componentes. Estes filtros podem ser divididos em várias categorias, a saber, "surge supressor", filtro de ruído, transformadores isoladores, "low-voltage fine reactors", reguladores de tensões das linhas, "motor-generator sets", "dual feeders with static transfer", motor/ gerador "set", UPS ("uninterruptible power supplies"), filtros de harmónicos e DVR ("Dynamic voltage restorer").

## 4.2 Seleção do equipamento apropriado

Os receptores finais de energia, e/ou a rede elétrica, antes e depois de escolherem o equipamento a instalar, para que os problemas sejam mitigados, devem seguir os seguintes passos [3]:

- Determinar o tipo de problema que enfrentam;
- Averiguar e corrigir todas as ligações à terra antes de se proceder a qualquer compra. Grande parte dos utilizadores, entre 80 a 90%, despreza esta situação importante. Ligações à terra mal feitas causam muitos problemas de qualidade de energia. Estes problemas podem ser corrigidos através de uma reconfiguração da rede e não necessitam de investimentos em equipamentos corretores;
- Avaliar soluções alternativas de condicionadores de potência;
- Fazer um planeamento dos equipamentos a adquirir;
- Determinar se os equipamentos são compatíveis com as cargas a alimentar;
- Selecionar e instalar o equipamento;
- Garantir a formação dos operadores, bem como fazer a manutenção regular dos equipamentos após a instalação;

A próxima figura 4.1 apresenta uma tabela que indica o equipamento apropriado a utilizar perante problemas da rede.

Power quality condition	Power Conditioning Technology								
	Surge suppressor	filter	Isolation transformer	VR (electronic)	VR (ferroresonant)	Motor-generator	Standby power system	UPS	Standby Engine generator
 Common mode Normal mode									
									
 Common mode Normal mode									
									
 Notches									
 voltage distortion									
 Sag									
 Swell									
 Under voltage									
 Over voltage									
 momentary interruption									
 Long-term interruption									
 Frequency variation									



 O problema deve ser corrigido através do regulador apresentado na lista horizontal  
 A performance da solução depende muito da situação da aplicação podendo ou não ser eficaz

Figura 4.1: Tecnologia reguladora vs defeito [3]

### 4.3 Procedimentos para regular a qualidade da energia

O procedimento para avaliar a qualidade da energia baseia-se numa série de parâmetros que têm de ser rigorosamente avaliados e caracterizados. Após a caracterização dos problemas, deve-se fazer a sua análise para então adequar a solução a instalar. Estas soluções devem, obviamente, responder aos princípios da qualidade/preço.

Num procedimento deste género, algumas das áreas a ter em conta são [36]:

- Coletar os dados;

- Hierarquizar os problemas de qualidade de energia a evitar do ponto de vista do tipo de consumidor;
- Analisar a sensibilidade dos equipamentos;
- Identificar os problemas específicos de cada situação e a forma como influenciam a qualidade de energia;
- Aplicar funções de medidas e simulações na avaliação das preocupações;
- Implementação de possíveis soluções dos problemas.

São intrínsecos a este procedimento todos os elementos possíveis para um estudo de qualidade de energia. O passo seguinte será proceder à caracterização sumária de cada um deles<sup>1</sup> [36].

#### **4.3.1 Identificar os problemas inerentes à qualidade de energia**

Cada consumidor tem necessidades diferentes, e portanto, os problemas, que a rede tem, podem ou não ser mais ou menos relevantes do ponto de vista do consumidor. Sabendo isto, é pois necessário elencar esses problemas que tanto podem atingir os consumidores em si, como a sua ligação à rede. Alguns dos possíveis problemas de qualidade de energia a avaliar listam-se seguidamente:

- Picos de tensão causados pelo constante ligar e desligar dos aparelhos;
- Nível de presença das cargas não lineares da instalação elétrica;
- Aquecimento dos transformadores devido aos harmónicos presentes;
- Intensificação de fenómenos transitórios com a instalação de condensadores de correção do fator de potência;
- Transitórios e "notching" associados à operação dos equipamentos à base de eletrónica de potência.
- Sobrecarga do condutor de neutro, devido à produção de harmónicos por parte das cargas;
- Severidade das cavas de tensão em circuitos ligados em paralelo ou falhas no sistema de distribuição;
- Interrupções momentâneas em instalações industriais e comerciais;
- Sobreensões geradas pelas trovoadas.

A identificação dos problemas em questão aumenta o foco nas mesmas. O desenvolvimento de um modelo a aplicar depende muito da quantidade de problemas que é necessário resolver.

#### 4.3.2 Colecionar dados

Na análise preliminar é fundamental que se conheça a carga do consumidor. Assim, em cooperação com o operador da rede de distribuição são recolhidos todos os dados dos equipamentos presentes, a saber:

- Caracterização da carga, motores, eletrónica de potência, computadores, variadores de velocidade e iluminação;
- Dimensões dos transformadores;
- Dimensão e localização dos condutores da instalação global;
- Equipamentos com interface de potência eletrónica;
- Unidades condicionadoras de potência instaladas;
- Sistema de distribuição.

#### 4.3.3 Monitorização e desenvolvimento de um programa de medida

A unidade distribuidora e o consumidor devem ser monitorizados para se caracterizarem as variações da qualidade da energia. O programa de medidas a ser aplicado deve ser desenhado de forma a ficar perto das cargas mais sensíveis que existam nas instalações dos consumidores. Ainda assim, a localização mais apropriada costuma ser à entrada das mesmas e, habitualmente é instalado pelo distribuidor de energia. Esse programa deve ficar regulado de tal forma, que seja capaz de caracterizar todas as perturbações que estejam a jusante da mesma. Este plano de monitorização deve atender às seguintes especificações:

- Fenómenos elétricos a monitorizar e duração da monitorização;
- Sensores em diferentes pontos da instalação de forma a precisar melhor as perturbações;
- Capacidade de armazenamento e de aquisição de amostras;
- Possibilidade de análise e monitorização dos dados adquiridos.

Este modelo necessita da constante cooperação entre o fornecedor de energia e o utilizador. O tipo de sistema de monitorização e a sua duração dependem muito dos parâmetros que se pretendem analisar e qual o rigor necessário.

#### 4.3.4 Avaliar as medidas recolhidas e desenvolver as soluções

Após a análise dos resultados recolhidos pelo sistema de monitorização, é possível caracterizar todos os parâmetros influentes da rede e as suas consequências. Também uma análise em termos económicos deve ser executada para avaliar as potenciais soluções a serem aplicadas. As alternativas podem ser as seguintes:

- Equipamento condicionador de potência ou filtros junto das cargas mais sensíveis;
- Aplicação de soluções generalizadas por parte da rede distribuidora à entrada da utilização;
- Mudança de estratégias no modo de operação da rede distribuidora, ao nível estrutural e ao nível construtivo;
- Modificação do design das cargas de forma a serem menos sensíveis às variações de qualidade de energia.

Desta forma, fica assim definida a metodologia a adotar aquando da necessidade de melhorar/avaliar a qualidade de energia. A figura abaixo 4.2 faz uma distribuição esquemática deste mesmo procedimento.

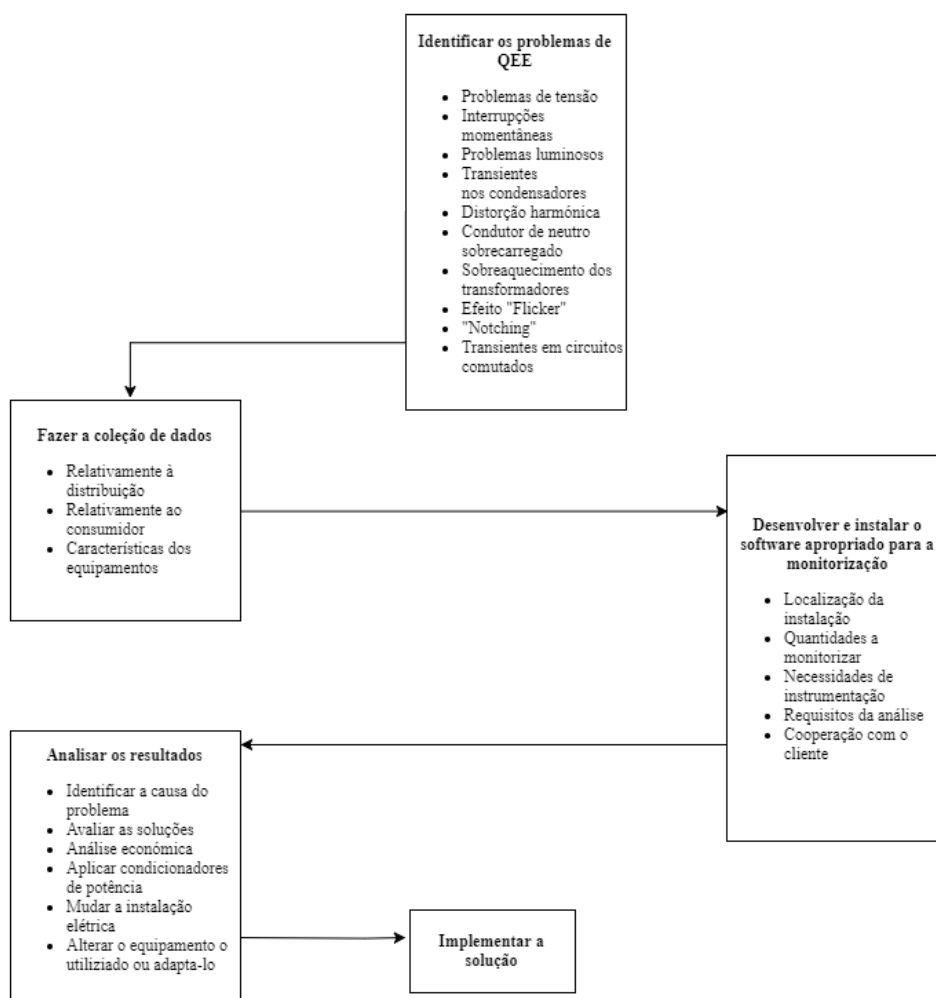


Figura 4.2: Procedimento em esquema



## 4.4 Síntese

Neste capítulo, foi feita uma análise das possíveis soluções a adotar aquando da necessidade de melhorar a qualidade de sinal recebida por uma entidade. Verifica-se que existe uma obrigatoriedade por parte do distribuidor em garantir um sinal de qualidade, utilizando, para isso, as várias hipóteses de instalação de "hardware" eletrónico capaz de mitigar estes problemas, ou, no pior dos casos, proceder a uma reestruturação da própria rede.

Finalizados que estão os capítulos que caracterizam e respondem às questões colocadas sobre paradigma atual energético, é, seguidamente, apresentado um capítulo onde se provará o impacto das energias renováveis na rede elétrica, bem como da aplicação de uma solução que visa mitigar problemas decorrentes da introdução de energia fotovoltaica.



## Capítulo 5

# Análise da qualidade da energia perante integração de penetração fotovoltaica

O objetivo desta análise centra-se na avaliação do impacto resultante da presença de microprodução numa rede de distribuição de Baixa Tensão (BT), tendo em consideração o funcionamento em regime desequilibrado da rede em análise. Como suporte, foi aproveitada parte de uma rede elétrica genérica, construída em "simulink" e executados testes [5]. Para este fim, e para não incorrer em redundância de análises, foi apenas utilizada parte da rede, desde o barramento 2 até ao barramento 29, ignorando a restante parte.

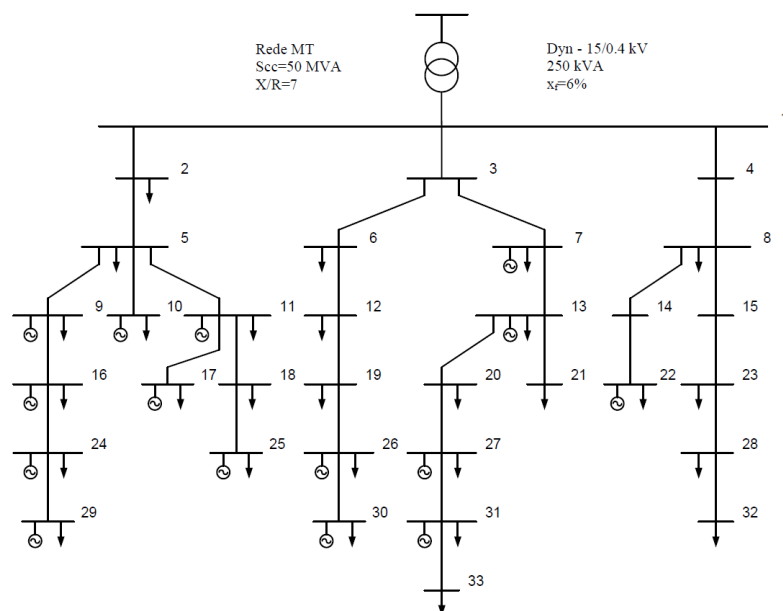


Figura 5.1: Esquema da rede de baixa tensão [5]

Como se pode constatar, a rede de BT (rede trifásica com neutro) é alimentada a partir de um

posto de transformação de 250 kVA. Por sua vez, o posto de transformação é alimentado a partir de uma rede de Média Tensão (MT) de 15 kV. Admite-se também, que do lado da rede MT, se encontra uma tensão sempre próxima de 1.05 p.u.

A caracterização das canalizações da rede, bem como das potências contratadas por cliente estão apresentadas nas Tabelas 5.1 e 5.2, respetivamente.

Tabela 5.1: Caracterização dos ramos da rede de baixa tensão

Ramo	De	Para	Resistência (Fase e Neutro)	Reactância (Fase e Neutro)
4	2	5	0,031	0,0065
8	5	9	0,0467	0,007
9	5	10	0,104	0,0053
10	5	11	0,2187	0,0105
15	9	16	0,0233	0,0035
16	11	17	0,2496	0,0053
17	11	18	0,0955	0,0075
23	16	24	0,0467	0,0035
24	18	25	0,1614	0,0053
28	24	29	0,1844	0,006

Tabela 5.2: Potências contratadas por fase

Potência Contratada [kVA]			
Nó	Fase A	Fase B	Fase C
2	3,45	3,45	0
5	0	0	3,45
9	6,9	3,45	3,45
10	3,45	10,35	0
11	3,45	0	6,9
16	0	6,9	0
17	10,35	0	0
18	0	3,45	3,45
24	0	6,9	10,35
25	0	3,45	10,35
29	3,45	3,45	10,35

A rede de BT inclui ainda diversas instalações de microprodução do tipo solar fotovoltaico (PV), cujas potências instaladas e respetiva fase de ligação são apresentadas na tabela 5.3.

Tabela 5.3: Potência Instalada em unidades de microprodução

Nó	Potência instalada [kW]		
	Fase A	Fase B	Fase C
9	0	1,7	0
10	0	3,68	0
11	0	0	3,45
16	0	3,45	0
17	3,68	0	0
24	0	0	3,68
25	0	0	3,68
29	0	0	3,68

Tabela 5.4: Diagrama cargas durante 24 horas

Hora(h)	Pg_sol(%)	Pcarga(%)
1	0	0,3
2	0	0,27
3	0	0,25
4	0	0,2
5	0	0,2
6	0,000495	0,22
7	0,029293	0,28
8	0,149139	0,4
9	0,351948	0,42
10	0,548126	0,45
11	0,702091	0,48
12	0,813801	0,5
13	0,874829	0,55
14	0,885796	0,6
15	0,844803	0,58
16	0,755799	0,57
17	0,601255	0,5
18	0,38228	0,65
19	0,16635	0,85
20	0,035232	1
21	0,000731	0,86
22	0	0,7
23	0	0,5
24	0	0,3

Considere-se que a rede de BT apresentada alimenta uma zona residencial em que se regista um fator de simultaneidade de cargas de cerca de 0.5 e que cada uma das cargas apresenta  $\text{tg}(\varphi)=0.4$ . Apresenta-se ainda na tabela 5.4 o diagrama de produção típico de uma instalação solar fotovoltaica num dia sem nebulosidade, bem como o diagrama de carga típico associado a cada consumidor (valores normalizados).

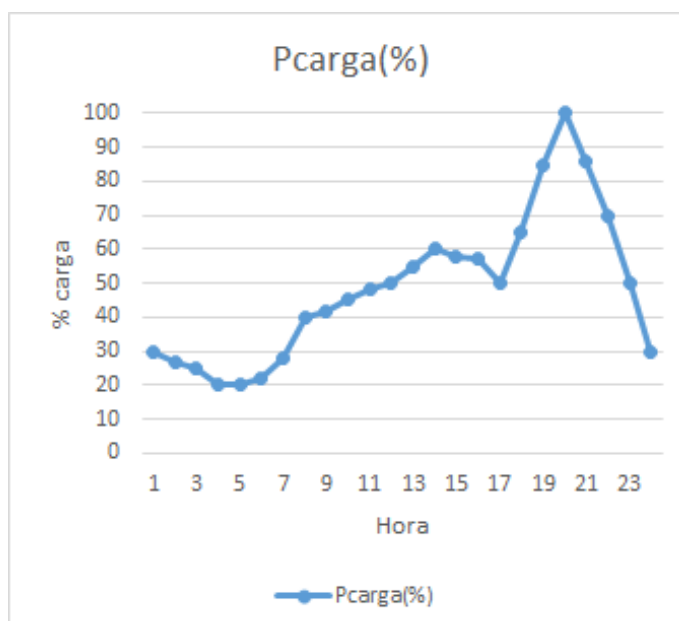


Figura 5.2: Diagrama de cargas em 24 horas

## 5.1 Estudo do perfil da rede com e sem microprodução

Este sub-capítulo tem como objetivo analisar o comportamento da rede aquando da existência, ou não, de penetração de PDIS e fazer o estudo dos perfis de tensão em vários pontos da rede.

A tabela 5.4 indica que apenas se começa a injetar microprodução a partir da hora 5, portanto, só a partir desta hora se vão verificar as diferenças de potências e efeitos sobre a tensão da presença, ou não, de PDIS.

Dada a morosidade de fazer a análise para todos os nós individualmente, decidiu-se analisar as tensões em 3 pontos distintos, mas que ao mesmo tempo pudessem refletir o comportamento da rede em geral, escolhendo o nó 2 por ser o mais próximo da rede MT, o nó 16 por ser um barramento mais central e, por fim, o barramento 29 que se situa no ponto mais a jusante do sistema a analisar.

### 5.1.1 Perfis de tensão sem microgeração

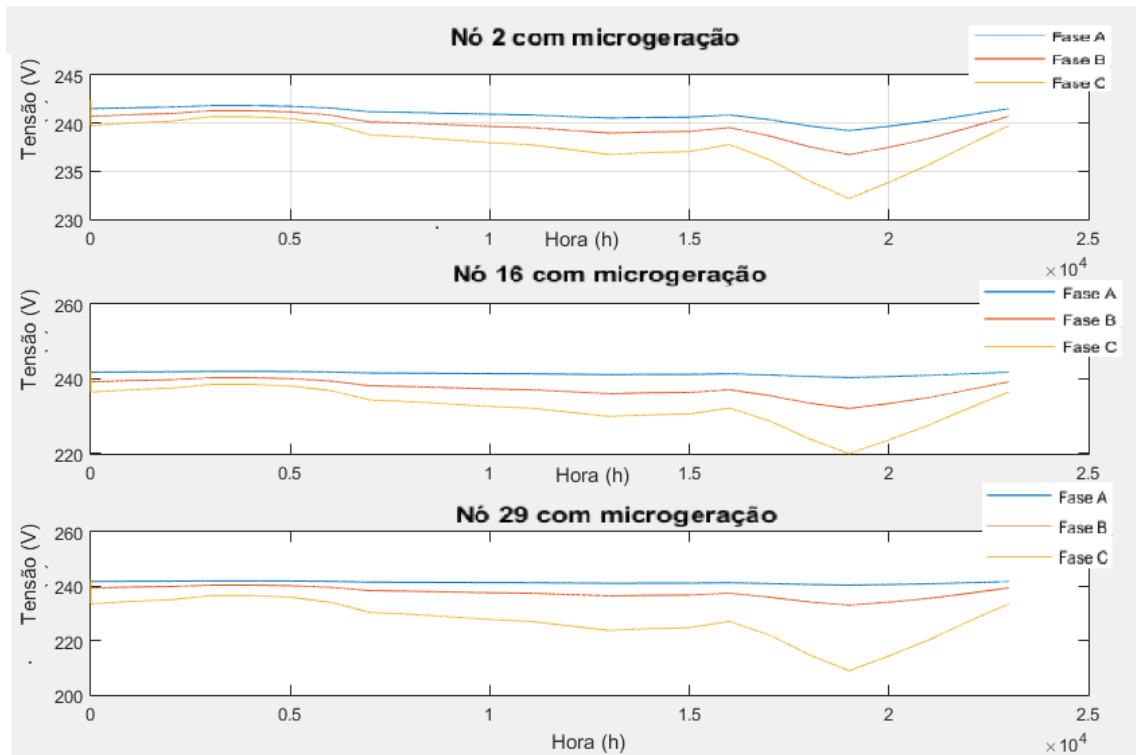


Figura 5.3: Perfis da tensão ao longo das 24h para as 3 fases

Através da análise da figura 5.3 comprova-se a ausência de microgeração na rede, pois não existem variações significativas nos perfis de tensão. Analisando, também, o diagrama de cargas, verifica-se que as tensões são estáveis enquanto a rede tem um fator de potência baixo, mas nas horas de maior consumo existe uma maior queda de tensão. Relativamente às fases, existe maior queda de tensão quando o consumidor tem uma potência superior. Por exemplo, relativamente à variação da fase C, verifica-se que, do nó 16 para o nó 29, houve um acentuar do declive, também devido ao facto do consumidor, naquele nó e naquela fase, ser de 10, 35 kVA o que acentua a queda, enquanto que no nó 16 é de, apenas, 6,9kVA.

### 5.1.2 Perfis de tensão com micro geração

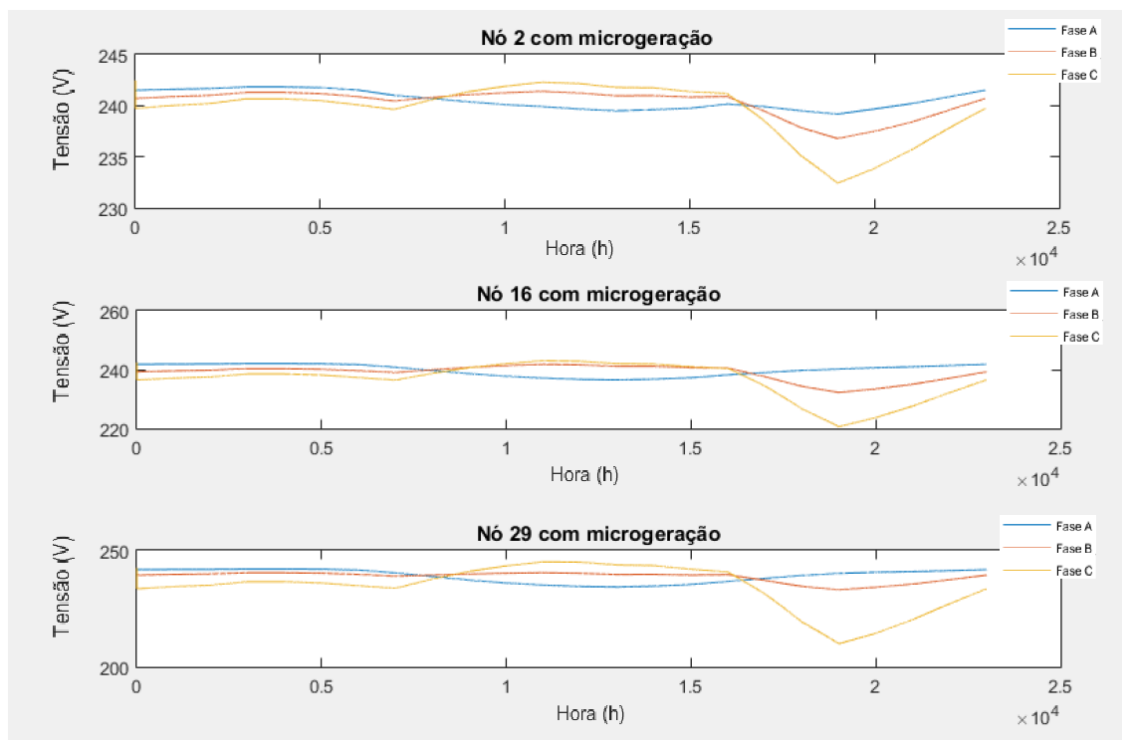


Figura 5.4: Perfis da tensão ao longo das 24h para as 3 fases

Comparativamente aos perfis de tensão da figura 5.3, verifica-se, na figura 5.4, que a partir da hora 6 existe uma variação das tensões nas 3 fases. Isto deve-se ao início de produção de potência ativa das unidades de microgeração, sendo esta variação mais perceptível nas horas em que a % de potência contratada é mais significativa, mais propriamente, a partir das 9 horas.

#### 5.1.2.1 Conclusões

Analisando individualmente os nós:

- O nó 2 é o que está mais perto da rede e, por isso, seria de esperar que fosse o menos afetado pela inclusão de microgeração. A fase C é a que mais oscilação sofre, dado não ter nenhuma carga nessa fase;
- O nó 16 não tem carga, nem na fase A, nem na C, por isso, a maior variação de tensão ocorrerá na fase B. Tal acontece também pelo facto de existir uma unidade de microgeração presente neste nó e, especificamente, nesta fase ;
- O nó 29 tem carga em todas as fases, sendo a fase C a mais carregada e, por esse facto, a mais sujeita a alterações. Este nó tem também presente uma unidade de microgeração;



- À medida que a rede é percorrida, de montante para jusante, a impedância da rede equivalente, vista da média tensão, vai aumentando, fazendo descer a tensão sem a consideração de PDIS. Porém, o mesmo não se verifica se, no nó em estudo, existir penetração que faça subir a tensão nesse mesmo barramento e nos barramentos circundantes.

### 5.1.3 Análise da Potência ativa e reativa

Neste sub-capítulo, analisar-se-ão os gráficos relativos ao fluxo de potência em alguns pontos da rede, nomeadamente na linha 1-2 mais a montante e na linha 16-24 mais a jusante da rede em estudo, já com microprodução introduzida.

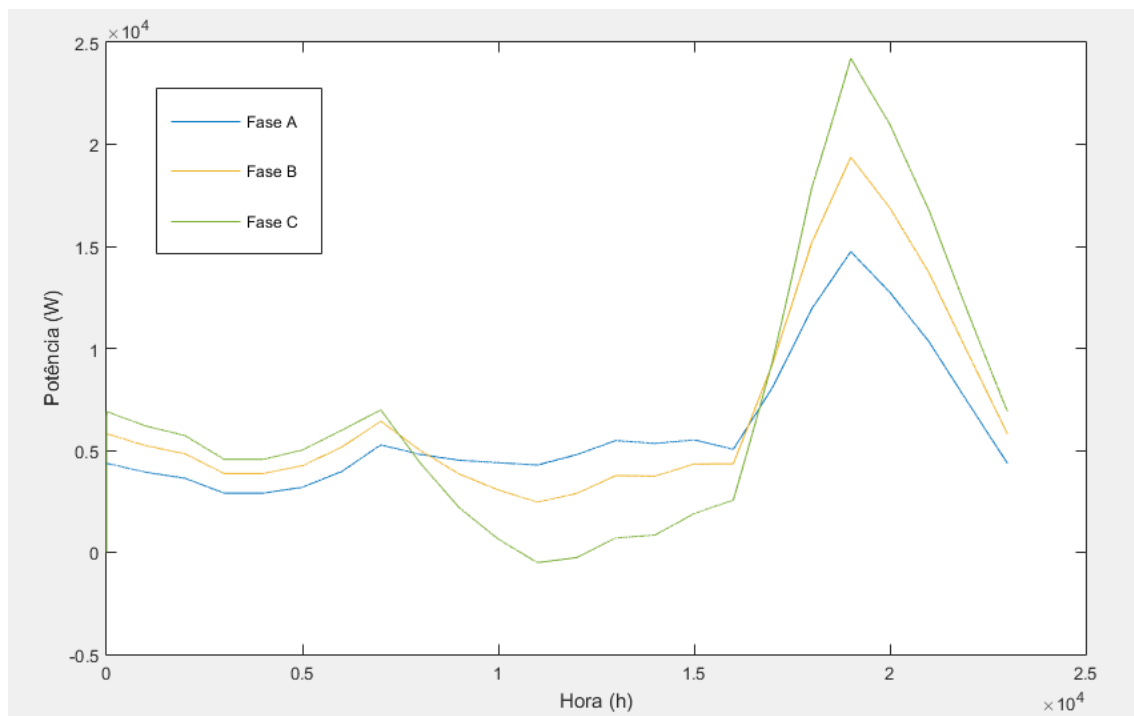


Figura 5.5: Fluxo de Potência ativa na linha 1-2

A carga, existente no nó 2, está distribuída pela fase A e B, sendo que a C não tem carga. Após a hora 6, é verificado o aumento gradual do fluxo de potência ativa, em virtude da inclusão de microgeração. As fases A e B são as que registam alterações menos significativas, pois apresentam-se menos uniformes e menos vulneráveis a oscilações de valor. A fase C apresenta-se em “fase” com as fases A e B nas primeiras horas do dia mas, a partir da hora 6, com a entrada em produção das unidades microgeradoras, esta tendência deixa de se verificar, muito pelo facto de ser a fase com maior potência produtora, deixando assim, a alimentação a jusante alimentar-se a si própria. Por outro lado, no período das 17-20 h verifica-se o contrário, as unidades microgeradoras deixam de funcionar, dando lugar a uma subida abrupta do fluxo de potência, pois a rede fica, novamente, dependente da rede MT.

Segue-se agora a análise de um outro ponto da rede.

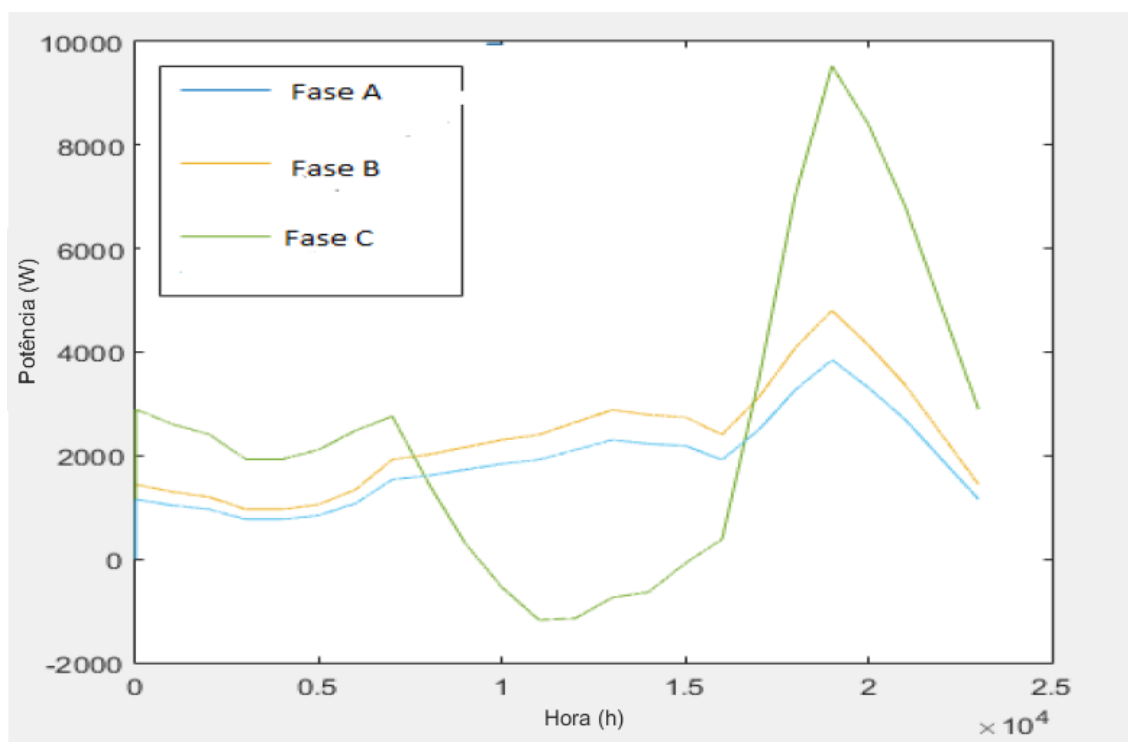


Figura 5.6: Fluxo de Potência ativa na linha 16-24

Com a escolha deste ramo mais a jusante da rede MT, pretende-se perceber as variações que as unidades de microgeração produzem na rede, e de que forma a sua proximidade dos nós em causa (16-24) influenciam os perfis de tensão. Assim sendo, verifica-se que as tensões apresentam um maior desnível relativamente à figura anterior 5.5, impulsionadas pelo aumento de impedância equivalente, que aumenta a jusante da rede, ou seja, há um aumento da dependência direta entre a tensão e a potência ativa. Relativamente a esta linha, com uma característica de rede mais fraca, é notória a variação dos fluxos de potência em todas as fases, principalmente nas horas de maior produção 9-16h. É também perceptível a descida de tensão na fase C, pois é a fase com maior implementação de microgeração e também pelo facto de ter estas unidades mais perto de cada carga, passa a absorver menos percentagem de potência vinda da rede. Verifica-se até uma injeção de potência ativa da linha 24 para a 16 como consequência da produção excedentária como já se verificou anteriormente.

Uma vez que, as unidades produtoras não produzem energia reativa, não existem grandes variações tal como ilustra a figura 5.7.

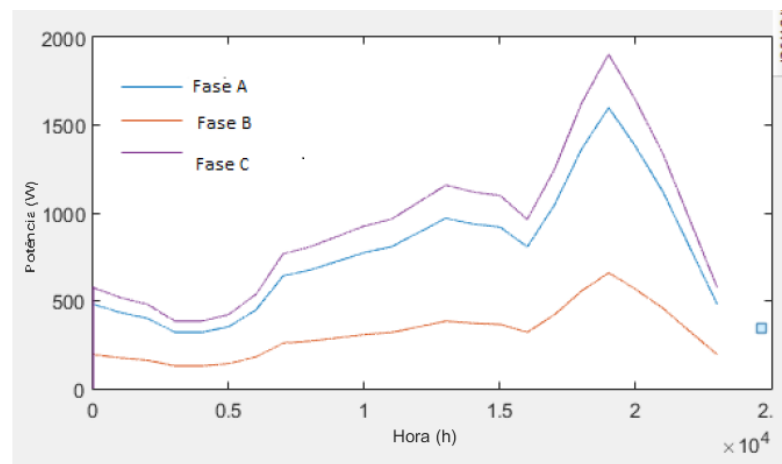


Figura 5.7: Fluxo de Potência reativa na linha 16-24

#### 5.1.4 Perdas Ativas

A presença de microgeração na rede reduz consideravelmente as perdas quando é incluída nos sistemas elétricos. A sua localização perto das cargas contribui para este facto, reduzindo as perdas por efeito de Joule como se verifica através das figuras 5.8 e 5.9.

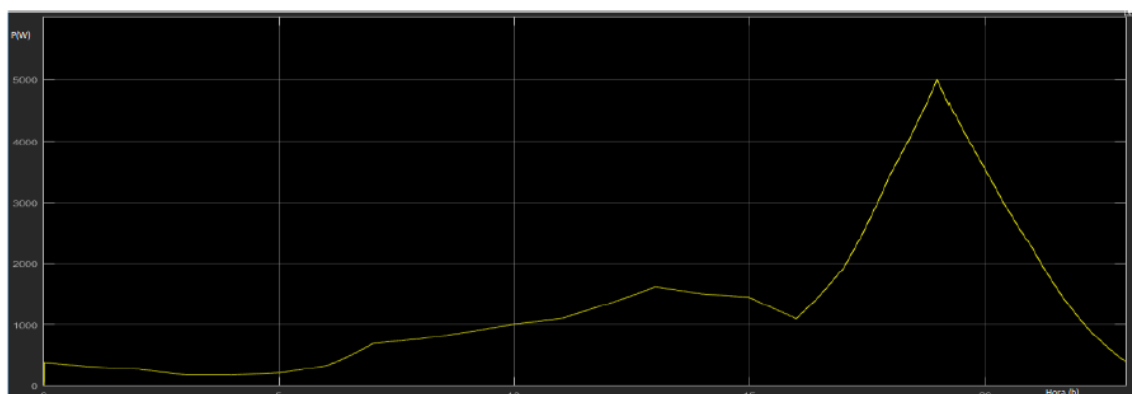


Figura 5.8: Perdas ativas sem microgeração

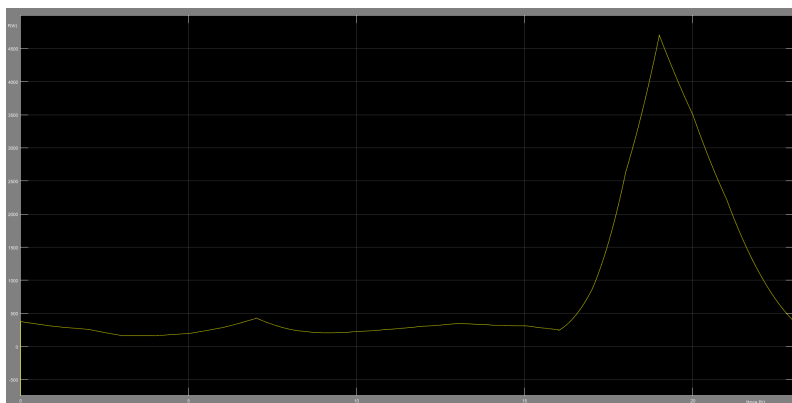


Figura 5.9: Perdas ativas com microgeração

## 5.2 Análise do impacto da introdução de PDIS de potência igual à contratada

Nesta fase, avaliaram-se as consequências nos perfis de tensão da rede resultantes da possibilidade de todos os clientes da rede BT instalarem unidades de microprodução com potências instaladas iguais à respetiva potência contratada.

### 5.2.1 Perfis de tensão

Ajustados os valores das potências na ferramenta "simulink", apresentam-se, em seguida, gráficos representativos das curvas de tensão para os nós 2, 24, 29.

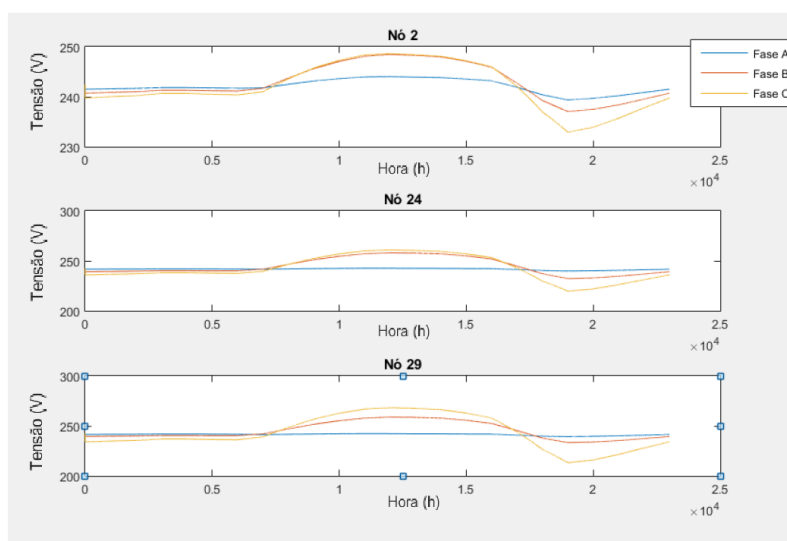


Figura 5.10: Tensões nós 2, 24 e 29

Numa primeira análise, verifica-se que a introdução de unidades microgeradoras em todos os nós da rede tem como consequência um aumento das tensões nos barramentos em estudo. Esta situação deve-se ao facto de existir mais potência ativa injetada e a rede ser maioritariamente resistiva. Apesar de, na teoria, ser positivo que todos os barramentos tenham microgeração, na verdade, este aumento de tensão acaba por ultrapassar, em alguns casos, o limite de 253 V ( $230 + 10\% \cdot 230$ ) desejado em horas de maior produção (11-15h).

### 5.2.2 Análise da potência ativa e reativa

O que se analisa seguidamente é a forma como reagem as curvas dos fluxos das potências ativas:

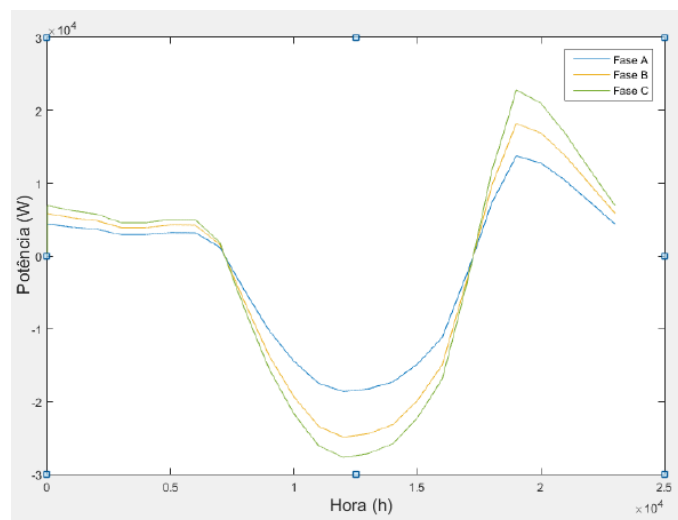


Figura 5.11: Linha 1-2

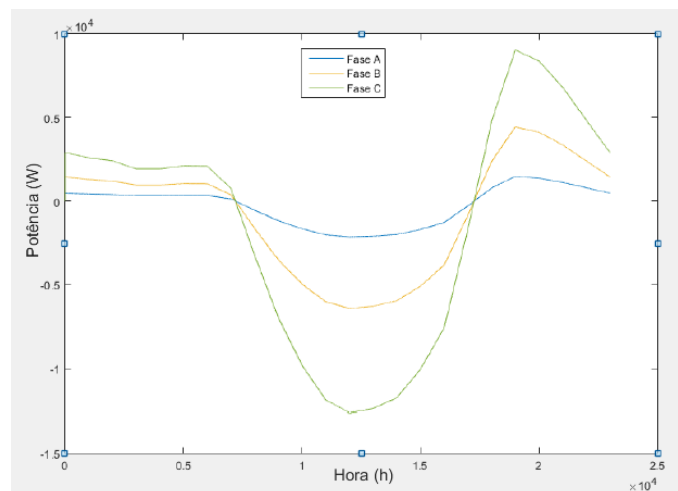


Figura 5.12: Linha 16-24

Os dois gráficos 5.11 5.12 representam os fluxos de potência de dois ramos da rede, um mais a montante 1-2 (“rede forte”), e outro mais a jusante 16-24 (“rede fraca”). Perante a presença de microgeração em todos os barramentos, verifica-se a existência de um período de excesso de energia ativa na rede a partir do momento em que existe produção por parte as unidades produtoras. Assim, a potência ativa assume o sentido inverso, das zonas mais a jusante para as zonas mais a montante.

A análise destes gráficos permite ainda concluir que os fluxos de potências da linha 16-24, comparativamente com a linha 1-2, diminuem. Tal deve-se à sua proximidade com a carga e também ao facto de as potências serem, em parte, consumidas de montante para jusante, fazendo com que o fluxo seja menor e a concentração de potência também o seja.

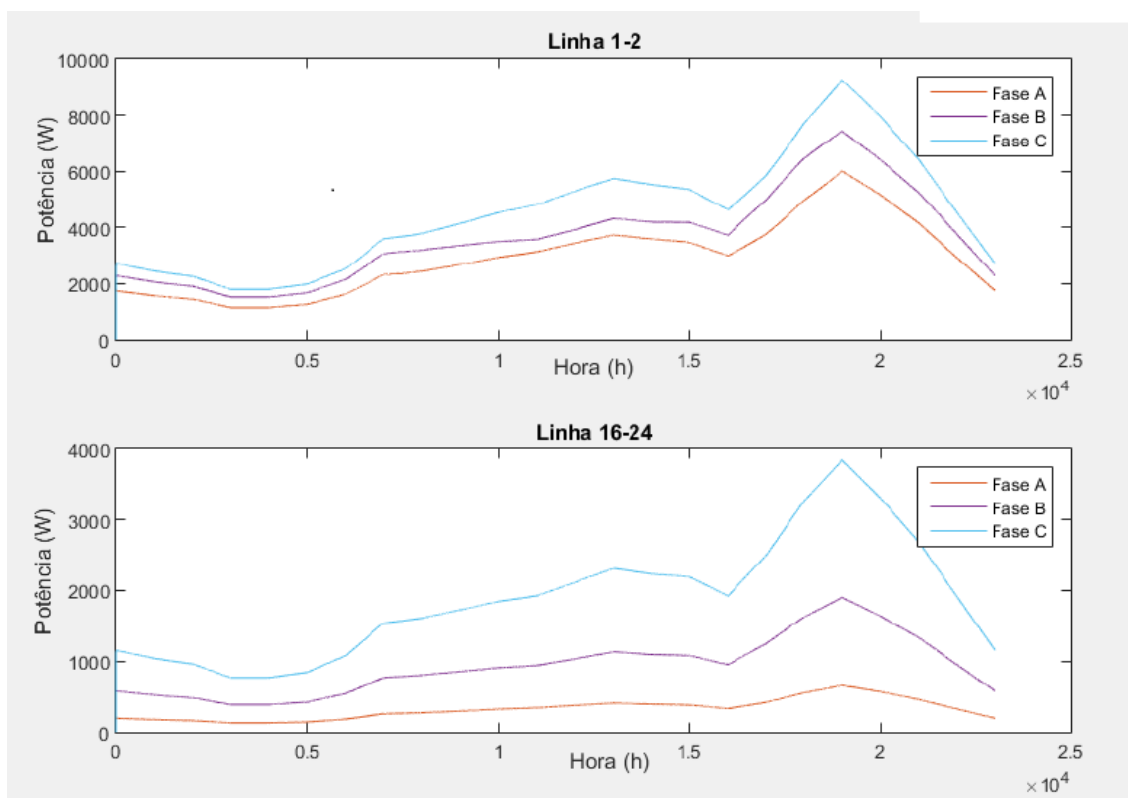


Figura 5.13: Fluxo de potência reativa linha 1-2 e linha 16-24

### 5.2.3 Perdas Ativas

Apresentar-se, na figura 5.14 o perfil de perdas ativas.

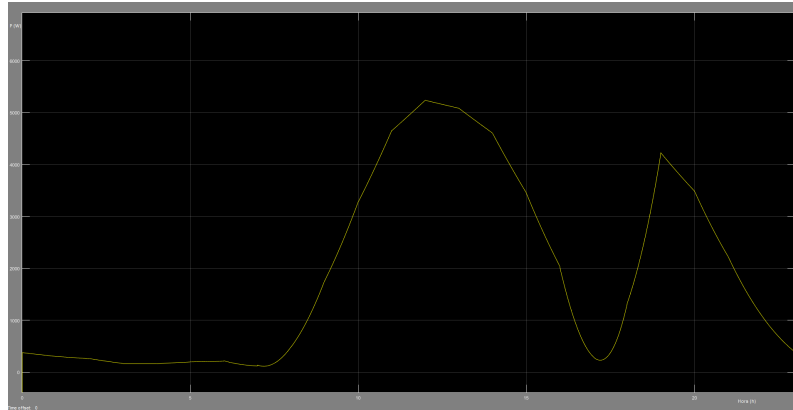


Figura 5.14: Perdas Ativas

O gráfico obtido era expectável, visto que o número excessivo de barramentos, com microprodução a mais, leva a que as tensões superem os limites estabelecidos nas horas de maior produção.

Assim, uma configuração da rede trabalhada desta forma, não será vantajosa, sendo necessária uma solução para atenuar estas sobretensões que se verificam como seja, por exemplo, o desligar dos equipamentos ou a alocação de mais cargas. Uma solução ideal seria encontrar uma forma de armazenar a energia excedentária para ser consumida quando necessário.

## 5.3 Controlo de potência reativa para regular a tensão

Como já visto no capítulo 2, um dos procedimentos a adotar, para fazer um controlo de tensão pode ser ajustar o fator de potência com que as unidades de microgeração que alimentam a rede. No sentido de testar esta teoria, foi aplicado a cada unidade microgeradora um bloco chamado "1-D Lookup Table" que funciona em malha fechada, recebendo, na entrada, a saída da potência ativa, regulando o FP de forma linear a partir de 50% da potência nominal, para um FP mínimo de 0,95 indutivo correspondente a 100 % da potência nominal.

A partir desta nova configuração, serão analisados os gráficos dos perfis de tensão, da potência ativa, reativa e das perdas ativas.

### 5.3.1 Perfis de Tensão

Completada a atualização da rede, fizeram-se as análises aos perfis das tensões dos nós estudados anteriormente. Seria expectável alguma variação nos níveis de tensões, já que a introdução de energia reativa resulta em efeitos sobre a tensão. Restava perceber se esse mesmo efeito sobre a

tensão da rede seria ou não benéfico para a mesma, lembrando que, para o caso de haver unidades de produção dispersa em todos os barramentos com carga, já se tinha registado que as tensões superavam, em algumas fases, os respetivos valores máximos estipulados para os mesmos.

Desta forma, registaram-se os seguintes resultados na figura 5.15:

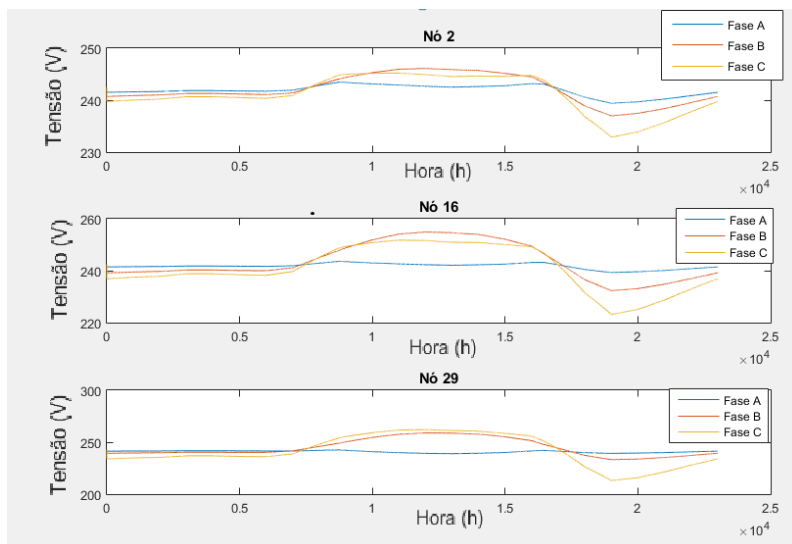


Figura 5.15: Perfis de tensão

Conhecidos os perfis de tensão, comparando com a figura 5.10 e vistas as duas figuras, verifica-se uma leve descida, em termos gerais, dos níveis de tensão, contudo, muito objetivamente, continuam-se a registar valores de tensão acima dos estipulados (mais ou menos  $10\%U_N$ ) como, por exemplo, no nó 29 nas fases B e C. Essas fases registam cargas e apresentam unidades de microprodução, justificando os perfis de tensões registados na figura anterior. Assim sendo, a conclusão que se retira é que a manobra aplicada na reativa sugere não ser suficiente para viabilizar o sistema e garantir o cumprimento dos limites estipulados para o mesmo, pois a rede é fortemente resistiva face à reatância ( $R \gg X$ ), característica de uma rede tipicamente de distribuição de baixa tensão. Tal situação faz com que a mesma dependa significativamente da potência ativa injetada e não da reativa, pelo que, um estilo de manobra com este intuito não se revela realmente eficaz.

### 5.3.2 Potência Ativa

O fluxo de potência, ativa ou reativa, foi outro ponto, alvo de estudo e análise neste capítulo. À partida, tendo em conta que o assunto deste sub-capítulo consiste em intervir sobre a reativa, seriam de esperar poucas alterações no perfil de potência ativa, sendo mais evidente essa inalteração em zonas mais fortes da rede. Os perfis de potência ativa foram os seguintes:



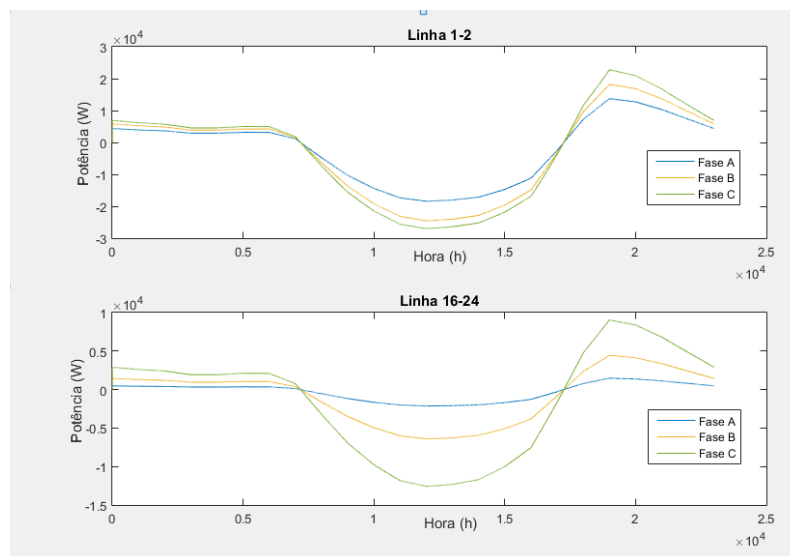


Figura 5.16: Fluxo de Potencia Ativa

Tal como foi dito anteriormente e, fazendo uma comparação com a figura 5.12, os perfis de tensão ativa praticamente permaneceram ou ficaram mesmo inalterados. Por outro lado, quer na zona forte, quer zona na fraca da rede, não se regista qualquer alteração dos perfis de ativa, ou seja, a potência ativa injetada pelas várias unidades de microgeração continua a ser a mesma.

### 5.3.3 Potencia Reativa

Para a energia reativa, seria de esperar, naturalmente, um comportamento totalmente diferente do que foi registado na alínea anterior. Assim sendo:

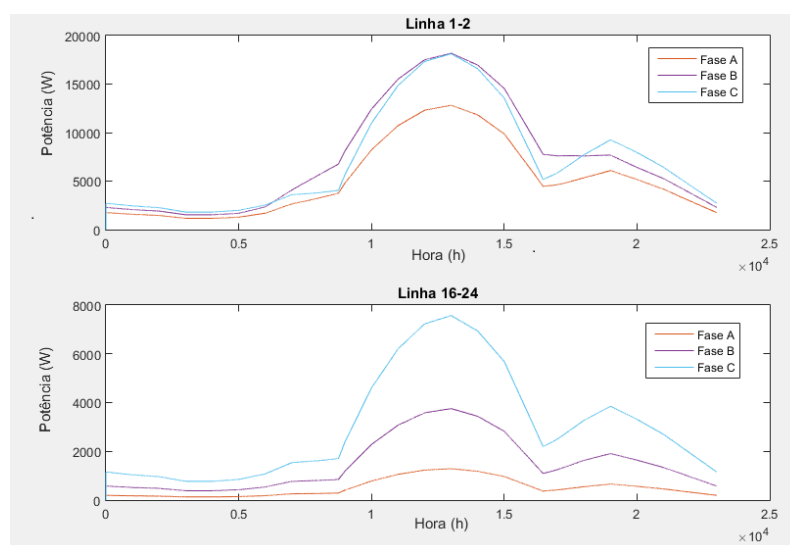


Figura 5.17: Fluxo de Potencia Reativa

Neste caso, comparando os gráficos da figura 5.13 com a anterior, é fácil de verificar a subida substancial dos níveis de reativa que fluem na rede, quer na zona fraca, quer na zona forte. Este efeito era realmente o esperado, uma vez que se criou consumo de potência reativa nas unidades de microgeração, passando assim a circular potência reativa de montante para jusante e assim alimentar esta carga reativa.

Concluindo, é possível constatar que, na tentativa de conseguir intervir na rede por forma a viabilizá-la, reduzindo as tensões para níveis aceitáveis, a atuação sobre a reativa não se revelou verdadeiramente efetiva.

### 5.3.4 Perdas Ativas

Relativamente a esta tópico, dadas as condições aplicadas, não se verificaram alterações relativamente ao sub-capítulo 5.2.2, mantendo-se o gráfico praticamente inalterado.

## 5.4 Controlo de potência ativa para regular a tensão

Nesta fase, o objetivo é aplicar um procedimento que seja capaz de regular as tensões acima do limite. A rede foi então alterada para lhe ser alocado um controlo PV, que é uma topologia de um microinversor para módulos fotovoltaicos, de forma a que respeitasse as condições seguintes:

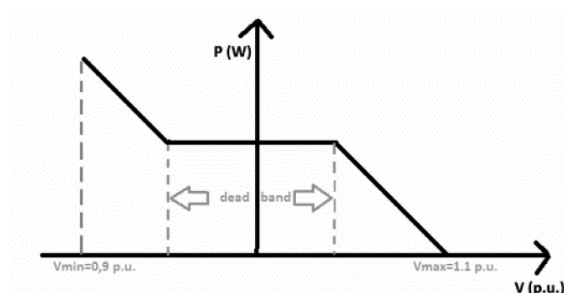


Figura 5.18: Topologia P-V

Neste sentido, a primeira tarefa seria verificar quais os nós e fases que estariam a exceder os limites de tensão, impondo 1,05 PU como máximo, arredondando para cima valores próximos de 253 V. A figura 5.19 mostra as tensões de todos os nós em estudo antes da implementação do seguinte controlo:

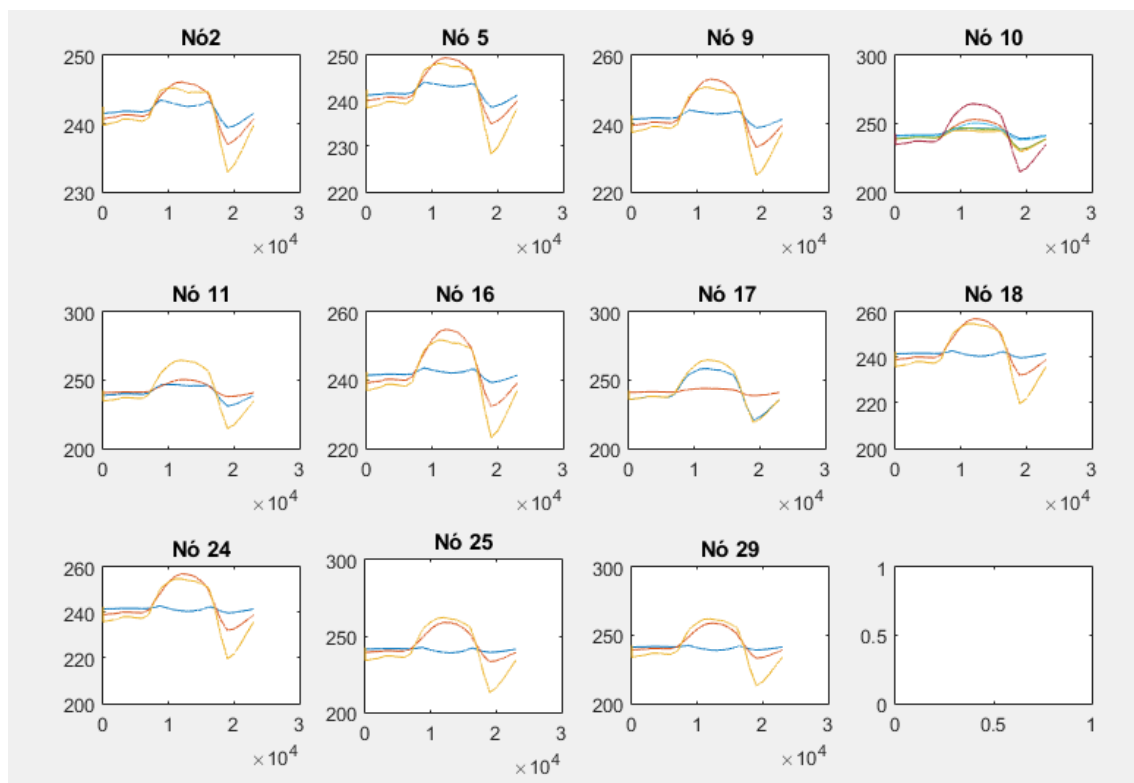


Figura 5.19: Perfis de tensão antes do controlo

A tabela 5.5 apresenta quais os nós e as fases que sofrem de sobretensões, a partir da análise dos pontos máximos, utilizando a aplicação MATLAB:

Tabela 5.5: Tabela ilustrativa dos valores máximos de tensão por fase

No	Fase	MaxTensão	Estado
5	A	244,7	normal
	B	251,8	normal
	C	252,7	sobretensão
9	A	244,5	normal
	B	255	sobretensão
	C	255,9	sobretensão
10	A	245,7	normal
	B	256,4	sobretensão
	C	250,7	normal
11	A	250,5	normal
	B	251,3	normal
	C	268,4	sobretensão
16	A	243,7	normal
	B	256,5	sobretensão
	C	257,3	sobretensão
17	A	262,6	sobretensão
	B	247	normal
	C	266,5	sobretensão
18	A	247,8	normal
	B	253,8	sobretensão
	C	273,2	sobretensão
24	A	242,6	normal
	B	258	sobretensão
	C	260,1	sobretensão
25	A	244,8	normal
	B	255,6	sobretensão
	C	279,7	sobretensão
29	A	242,5	normal
	B	258,8	sobretensão
	C	268,1	sobretensão

### 5.4.1 Perfis de tensão

Constata-se que se justifica uma aplicação do controlo de potência ativa nos nós a vermelho da tabela 5.5 através da regulação de tensão.

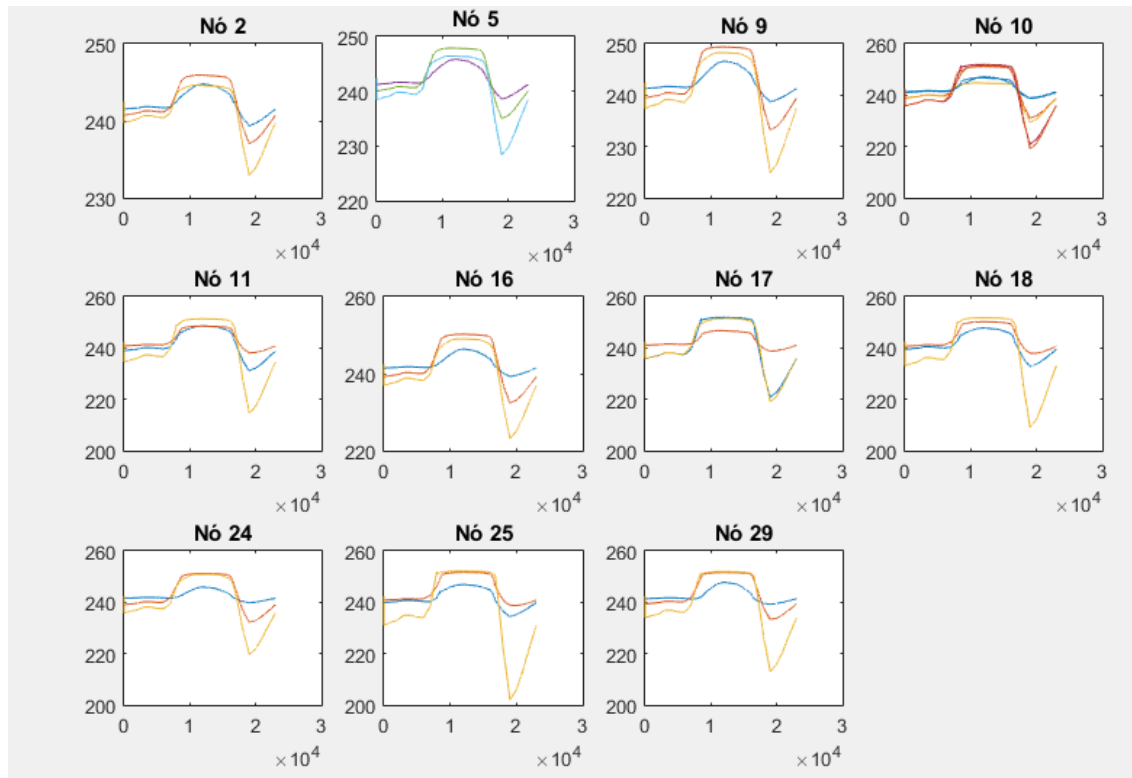


Figura 5.20: Perfis de tensão atualizados

Após aplicação deste procedimento, seria expectável alguma redução nos picos de tensão, já que à medida que a tensão, nas unidades fotovoltaicas de produção, aumenta, maior é a redução de potência ativa que é injetada nas linhas. Após a redução das tensões para dentro das gamas exigidas, o objetivo é o de minimizar a potência ativa cortada, já que é a potência que a rede acaba por se ver obrigada a desperdiçar.

Numa primeira fase, definiu-se que o controlo de potência se iniciava assim que a tensão superasse os 1,05 PU, ou seja,  $V_1 = 1.05$  PU. Nesta primeira implementação, registou-se a redução da tensão em todos os barramentos da tabela 5.5 para valores aceitáveis, ou seja, este controlo permitiu viabilizar o sistema. Feito isto, passou-se para o segundo objetivo, reduzir ao máximo possível a quantidade de energia cortada. Para cada barramento, fez-se a regulação do valor de  $V_1$ , em que o desejo era “atrasar” ao máximo o "timing" em que se atua na rede, diminuindo assim a potência que seria cortada nesse bloco de microgeração. Para exemplificar isso mesmo, aponta-se o caso da carga do nó 5, onde se afinou, à 2ª tentativa, a tensão  $V_1 = 1.08$  p.u. Essa regulação permitiu que, para este barramento, a potência cortada chegasse a ser nula sem que a tensão superasse o máximo admissível. Este processo está ilustrado na figura 5.21.

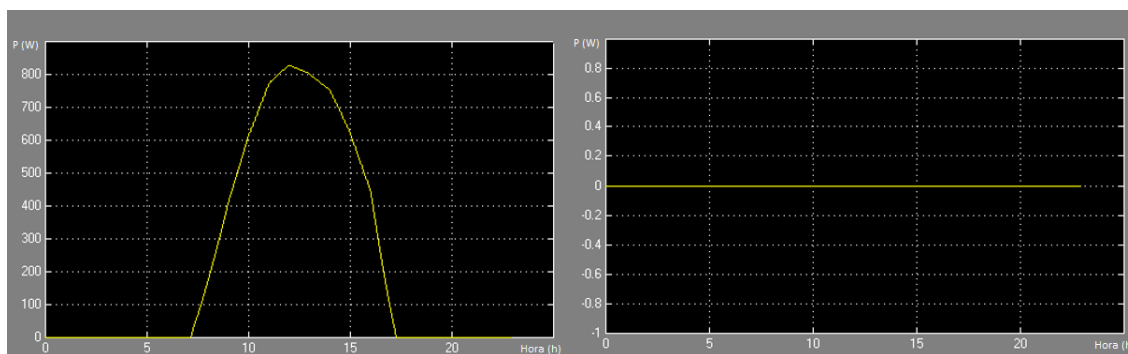


Figura 5.21: À esquerda, a potência cortada para  $V1=1.05$  PU e à direita para  $V1=1.08$  PU

Desta forma, tentou-se arranjar uma solução equilibrada que minimizasse a potência cortada e mantivesse as tensões dentro dos limites, chegando-se às soluções registadas na tabela 5.6:

Tabela 5.6: Configurações tomadas para cada módulo PV das microgerações

Nó	Fases com MG	V1	Potência Cortada nula?
5	C	1,08	VERDADEIRO
9	A	1,08	VERDADEIRO
	B	1,08	VERDADEIRO
	C	1,08	VERDADEIRO
	C	1,08	VERDADEIRO
10	A	1,08	VERDADEIRO
	B	1,09	FALSO
11	A	1,082	VERDADEIRO
	C	1,09	FALSO
16	B	1,08	VERDADEIRO
17	A	1,09	FALSO
18	B	1,082	VERDADEIRO
	C	1,09	FALSO
24	B	1,09	VERDADEIRO
	C	1,09	VERDADEIRO
25	B	1,09	FALSO
	C	1,09	FALSO
29	A	1,09	VERDADEIRO
	B	1,09	FALSO
	C	1,09	FALSO

Torna-se evidente que, à medida que se percorre a rede, a tendência de anular, na sua totalidade, a potência cortada é cada vez mais difícil.

As tentativas de “atrasar”  $V1$ , ou seja, alargar a banda da "dead band", pretendem reduzir o total de potência consumida. Essa estratégia torna-se totalmente eficaz para barramentos na zona mais forte da rede, enquanto que, nos nós mais impedantes da mesma, se afigura como uma tarefa mais difícil.

Por outro lado, regista-se que, para horas de maior carga, hora 20, tendo em conta que, neste período, a produção solar é residual, este tipo de controlo não tem capacidade de corrigir o facto das tensões, nesses períodos, se apresentarem abaixo do limite inferior dessa produção. Esse comportamento é visível na figura seguinte na qual estão presentes todas as tensões depois da configuração feita.

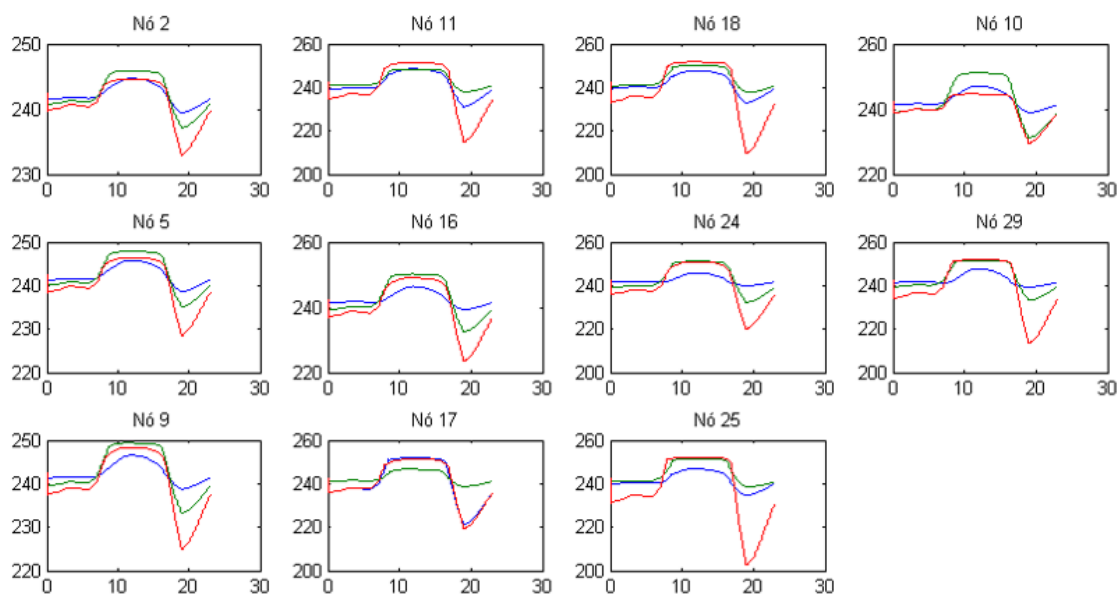


Figura 5.22: Registo das tensões após implementação das configurações

## 5.5 Fluxos de Potência Ativa e Reativa

Por fim, analisaram-se também os perfis das potências, ativa e reativa e, de facto, comprova-se que, às horas de maior consumo existe uma grande produção de ativa, sendo que, no caso da linha mais a montante (linha 1-2), essa potência produzida a jusante acaba por se concentrar, havendo grande fluxo de ativa em direção à rede MT. Por outro lado, também é visível na figura 5.23, tal como era expectável, este tipo de produção aliado a um controlo PV, que em pouco ou nada afeta os perfis de potência reativa nas linhas do SEE. É ainda visível que, durante as subidas de produção na zona, a meio do dia, a reativa permanece quase inalterada, o que comprova o fator unitário que a microgeração apresenta, contribuindo assim para o bom desempenho da rede.

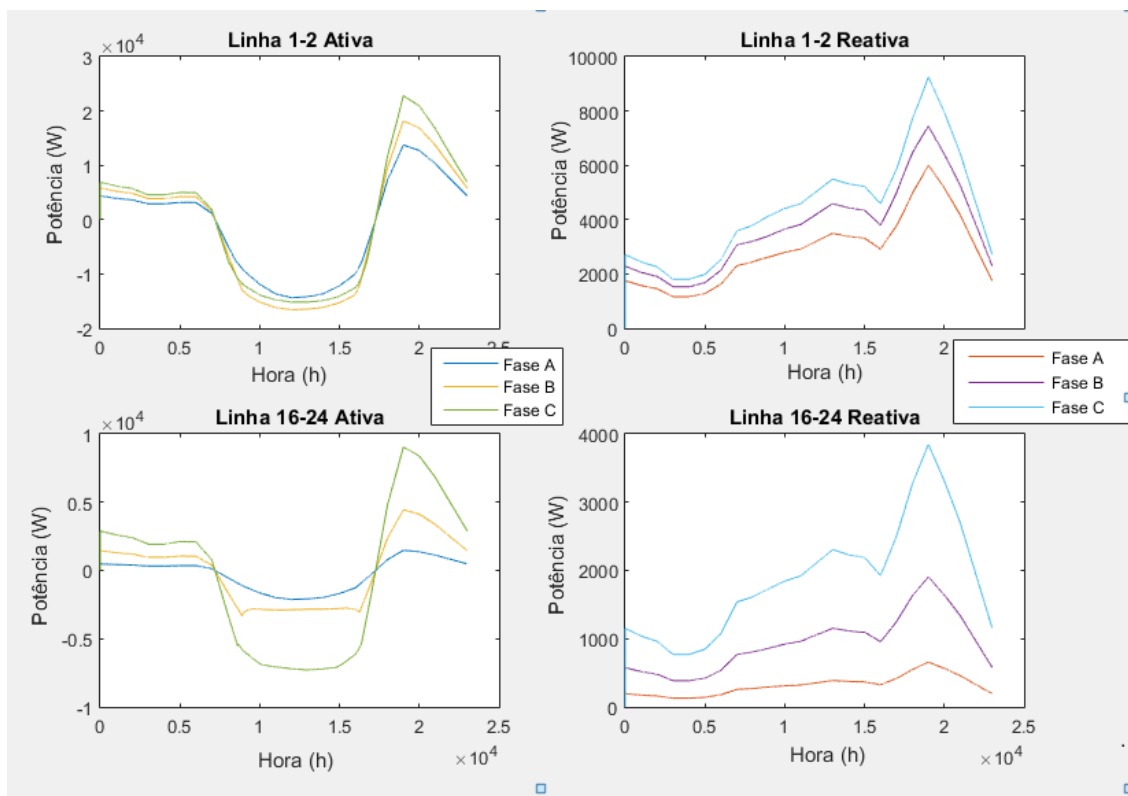


Figura 5.23: Perfis de potência ativa e reativa

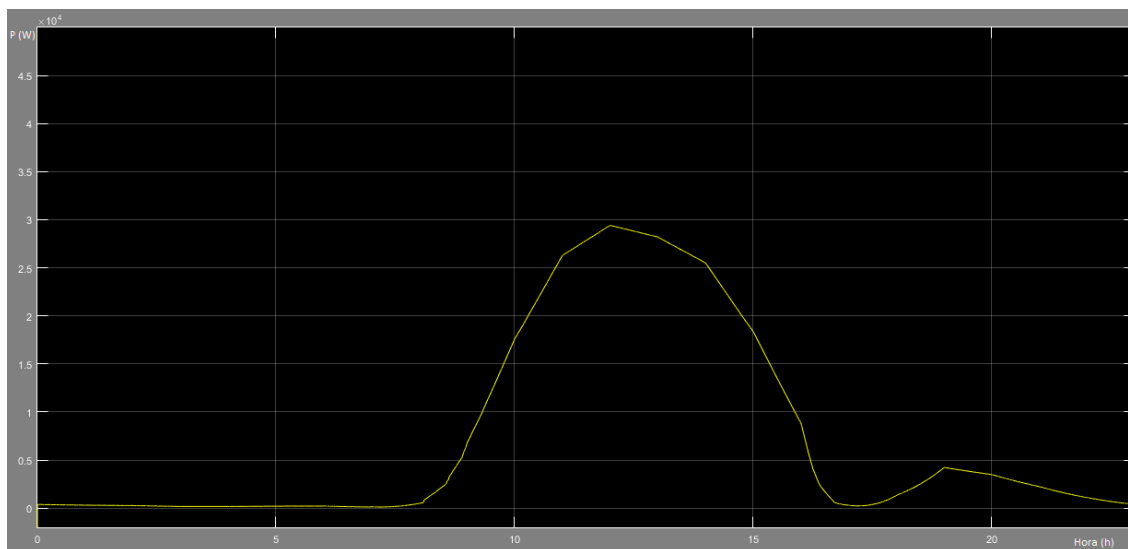


Figura 5.24: Perdas ativas

Na figura 5.24 visualiza-se o gráfico do comportamento da potência cortada ao longo do tempo, sendo naturalmente uma curva com valor mais alto no período de maior produção solar, sendo assim necessário proceder ao corte de potência.



## 5.6 Conclusões

Como se pôde constatar ao longo deste capítulo, a introdução de unidades microgeradoras na nossa realidade energética, veio trazer a necessidade de se proceder a novas investigações e estudos acerca das redes elétricas. Com efeito, urge apurar de que forma essas unidades influenciam um mundo que cada vez produz e consome mais potência e, em que as redes elétricas são cada vez mais extensas, havendo grandes quedas de tensão.

Ficou clara a ideia de que, para um pleno funcionamento da rede, é necessário que os limites estipulados sejam cumpridos, e que para que tal aconteça, é indispensável proceder a um rigoroso controlo, quer junto dos produtores, quer das cargas.

Partindo do pressuposto que a potência injetada nos perfis de tensão é predominantemente ativa, a resistência predomina em relação à reatância. Depois de realizados vários testes retiraram-se as seguintes conclusões adicionais:

- As unidades produtoras e as cargas devem ser repartidas uniformemente pelas 3 fases a fim de que nenhuma delas seja sobrecarregada. Este procedimento permite que os perfis de tensão sejam mais equilibrados, impedindo que haja valores de tensão acima dos esperados nos barramentos, bem como quedas de tensão demasiado acentuadas;
- A microprodução traz um efeito elevador das tensões nos barramentos, sendo agravado à medida que a distância até à MT aumenta, sendo, por isso, necessário retirar de serviço parte da produção distribuída da rede;
- Quando se verificam excedentes de produção nos barramentos com microprodução, existe um fluxo de potência inverso, ou seja este vai de jusante para montante da rede em direção ao transformador;
- A fim de resolver estes problemas, pode-se utilizar um controlo P-V sobre todos os inversores solares, o que resulta numa redução dos perfis de tensão, permitindo que estes se encontrem dentro dos valores estipulados.



## Capítulo 6

# Conclusões e Trabalho Futuro

O compromisso conjunto, assumido aquando da aceitação da temática deste trabalho, fez com que, a pesquisa, a leitura, a reflexão, a partilha de ideias e sua discussão me ocupassem durante os últimos meses. Cumpria-se, assim, o objetivo de alargar o conhecimento no que respeita a situação energética atual, especificamente, fazer a leitura da rede elétrica mundial, a sua análise e identificar os pontos fortes e pontos fracos que a definem.

Dado o crescimento exponencial que a eletrónica tem tido, pode-se afirmar que a mudança do paradigma no setor energético, a que se assiste hoje, tem paralelo com a mudança ocorrida há 100 anos quando o carvão deu lugar à energia produzida através do petróleo. Atrevo-me a acrescentar que essa mudança se assemelhará também à provocada pela revolução industrial ocorrida entre 1820 e 1840.

Com efeito, se se estabelecer a comparação entre aquilo que eram os instrumentos computorizados de há 30 anos com os que agora existem, verifica-se que as mudanças são abismais. Paralelamente, a evolução acompanha a forma como é organizada a rede elétrica mundial, em que a produção descentralizada assume um papel cada vez mais considerável, ainda que preocupante, pois cria desafios diários aos operadores da rede no sentido de que a qualidade da energia seja mantida nos parâmetros aceitáveis.

É um desafio para o cidadão comum estar ciente de tal mudança que, entra rapidamente nas nossas habitações. Ver as coisas a acontecer e ter a noção de como elas acontecem é o desafio fascinante do investigador.

No final deste estudo, sinto que o aporte de conhecimento é significativo. Sinto-me mais preparado para fazer parte do grupo dos investigadores desta matéria e com vontade acrescida de desenvolver projetos mais ambiciosos que criem novas formas de mitigação dos problemas inerentes à qualidade da energia.

### 6.1 Satisfação dos Objetivos

É chegado o momento de relembrar os objetivos traçados no início deste trabalho e avaliar a sua consecução de forma sumária.

Fazendo o balanço quanto à consecução dos objetivos traçados pode dizer-se que foram concretizados. Assim, no que diz respeito ao primeiro objetivo, ele é atingido pois o capítulo 3 faz uma reflexão sobre a forma como funciona o contexto energético convencional e atual, ao mesmo tempo faz as suas descrições. Em síntese, verificou-se ser inegável que a introdução de PDIS, em qualquer ponto da rede, altera por completo toda a monitorização inerente e constitui um desafio mais rigoroso para os operadores, por outro lado, implica também a implementação de um controlo mais localizado, em detrimento do habitual controlo central. Relativamente ao segundo objetivo, este foi atingido no cap 2, ao ter sido feita a análise e definição de todos os problemas enfrentados pela rede, tanto ao nível da frequência como da tensão.

No seguimento dos problemas identificados no capítulo 2, no capítulo 3 especificam-se os problemas da integração de energias renováveis, em particular as provindas do vento e do Sol, nesta nova configuração da rede, ao mesmo tempo que se faz um registo bibliográfico do estado atual destas tecnologias em ascensão, dando-se resposta ao terceiro objetivo traçado.

No que respeita ao quarto objetivo, o capítulo 4 é caracterizado por apontar algumas soluções para diminuir o impacto dos problemas decorrentes de toda a eletrónica existente no sistema elétrico, assim como da introdução das PDIS.

Finalmente o capítulo 5, foram feitos testes a uma rede baseados numa simulação em MATLAB, onde foram comprovados os problemas que a introdução de energia renovável introduz na rede, tendo também sido analisado o seu impacto e aplicadas possíveis soluções para mitigar tais problemas.

## 6.2 Trabalho Futuro

De forma a completar este estudo, seria também necessário efetuar testes para perceber qual o impacto da PDIS na frequência da rede. Ficando isto para um posterior trabalho.

Todos aqueles que lutam por um futuro energético mais sustentável têm a necessidade de percorrer um caminho conjunto. Combinar todos os elementos da rede elétrica, de forma a que eles estejam em harmonia, não é uma tarefa exequível, pois essa harmonia está sempre a ser quebrada pela constante evolução dos componentes eletrónicos. Para repor essa harmonia é necessário que a investigação das metodologias de correção também seja capaz de acompanhar a evolução.

## Anexo A

# Rede simulink

Nesta secção serão colocados os "print screens" mais relevantes do trabalho executado em MATLAB.

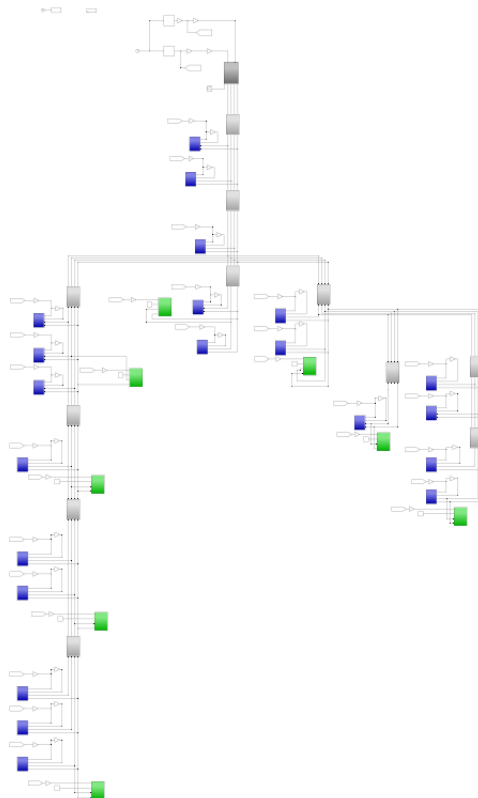




Figura A.2: Outro pedaço da rede sem micro geração

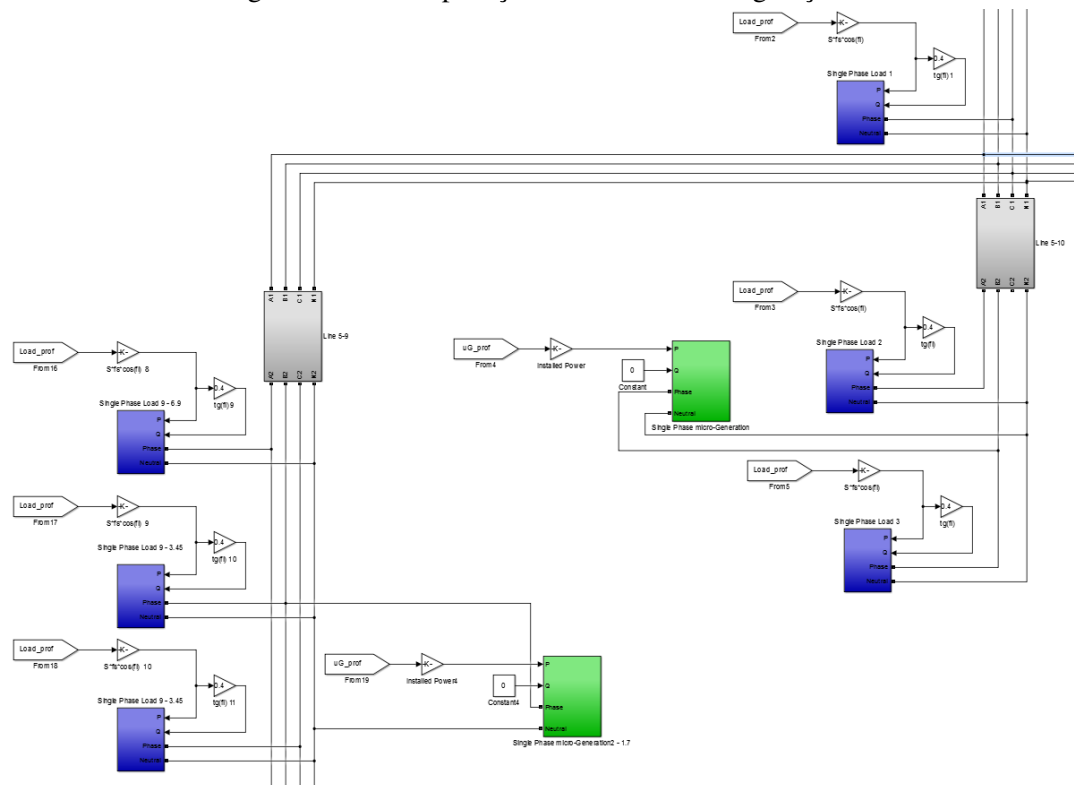


Figura A.3: Rede com micro geração focada na alteração

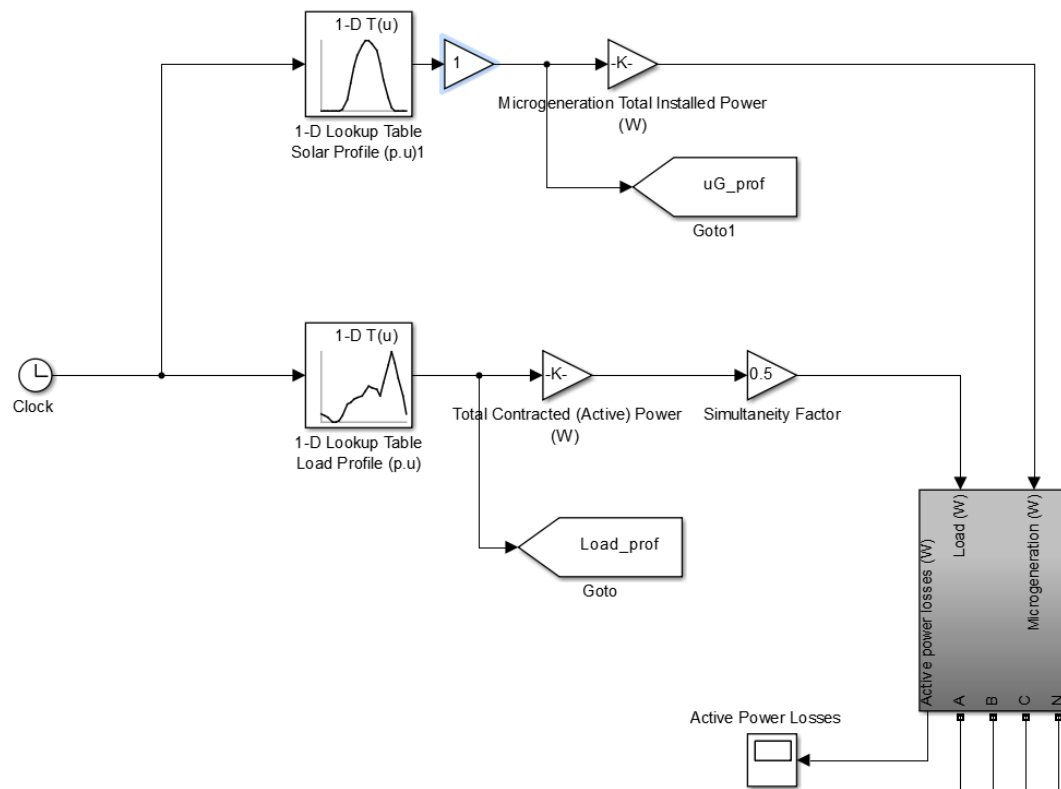




Figura A.4: Alteração da quantidade de microprodução para igualar a carga

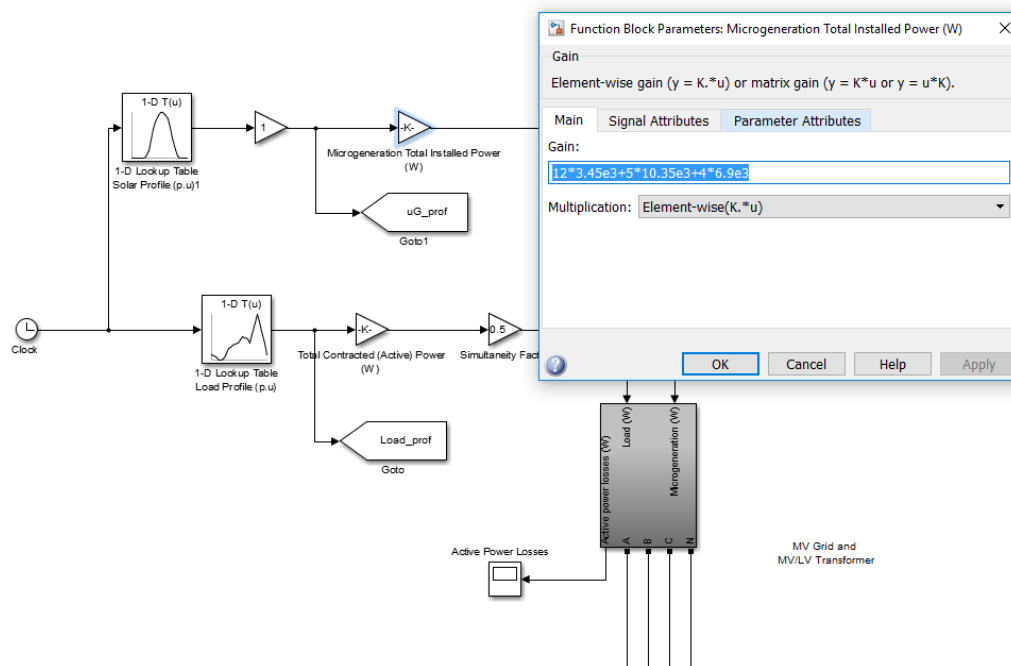


Figura A.5: Introdução do bloco "Lookup table" nas unidades de microgeração

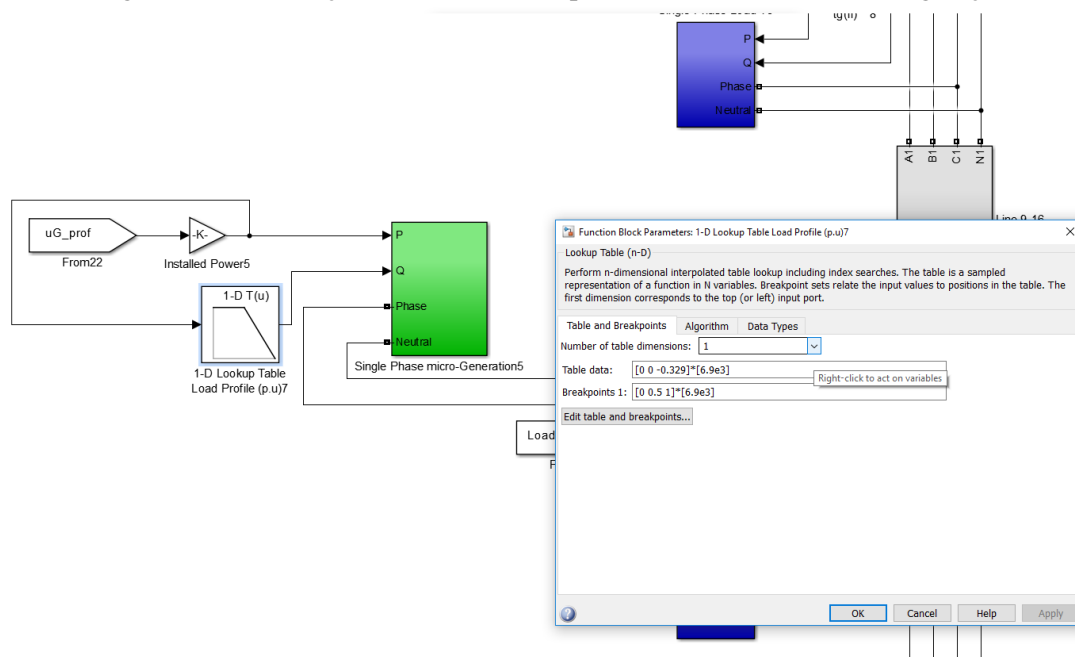


Figura A.6: Bloco corretor das sobretensões sem otimização de potência cortada

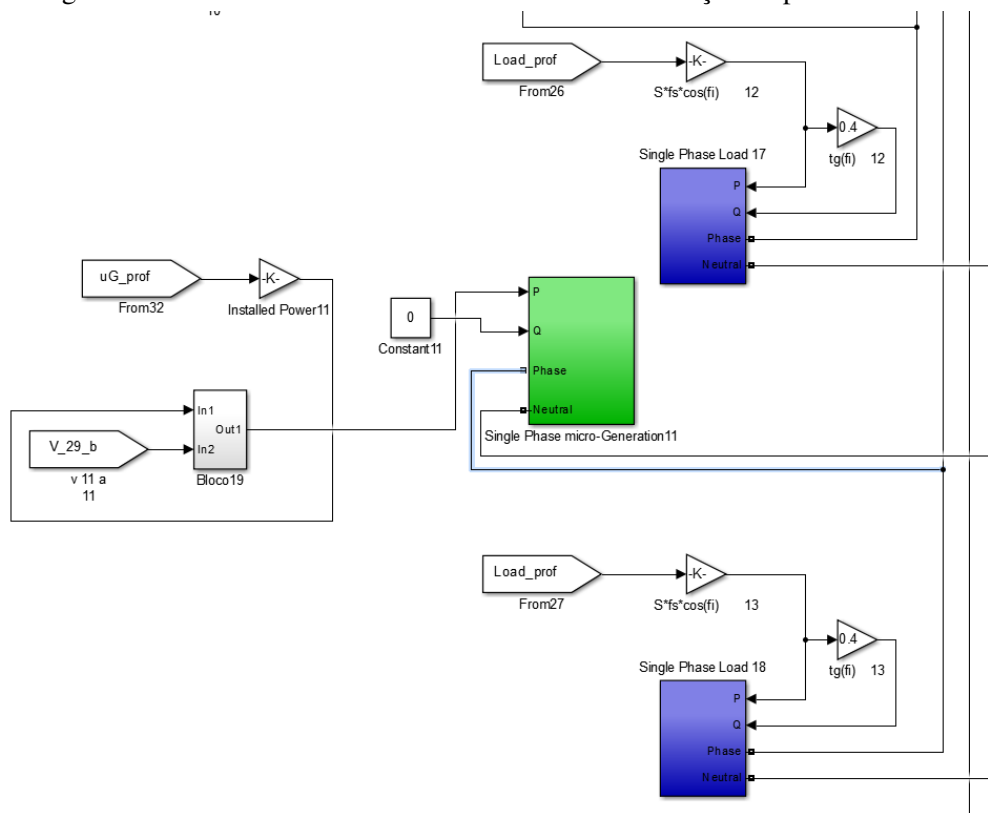
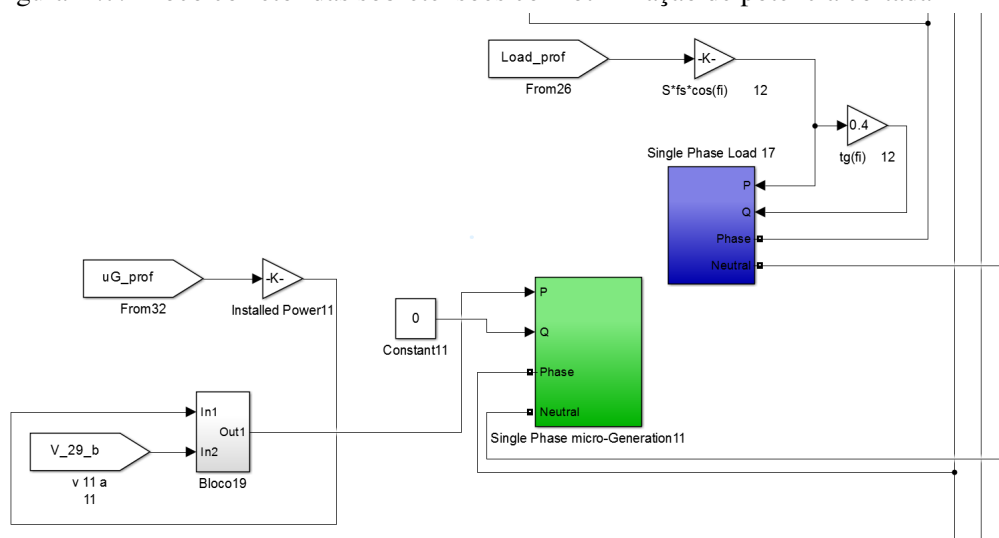


Figura A.7: Bloco corretor das sobretensões com otimização de potência cortada



# Referências

- [1] Renewable energy statistics. URL: [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Renewable\\_energy\\_statistics](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Renewable_energy_statistics) [último acesso em 2017-7-7].
- [2] Surya Santoso H. Wayne Beaty Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan. *Electrical power systems quality*. McGraw-Hill, united states of américa edição, 2012.
- [3] Barry W. Kennedy. *Power Quality Primer*. McGraw-Hill, 2000 edição, 2000.
- [4] EDP. O que é a energia reativa. URL: <http://www.edp.com.br/distribuicao/edp-bandeirante/informacoes/grandes-clientes/energia-reativa/o-que-e-energia-reativa/Paginas/default.aspx> [último acesso em 2017-6-14].
- [5] Carlos Moreira. Slides produção dispersa, 2016.
- [6] Nanogrids, microgrids, and big data: The future of the power grid. URL: <http://spectrum.ieee.org/energy/renewables/nanogrids-microgrids-and-big-data-the-future-of-the-power-grid> [último acesso em 2017-7-7].
- [7] Unknown. Benefícios da energia eólica para a humanidade. URL: <http://meioambiente.culturamix.com/noticias/beneficios-da-energia-eolica-para-a-humanidade> [último acesso em 2017-7-9].
- [8] O. Edenhofer. *Renewable energy sources and climate change mitigation*. Cambridge University Press, new york, edição, 2009.
- [9] Thomas Ackerman. *Wind power in Power Systems*. Wiley, 2012 edição, 2012.
- [10] K. Elkington. *The dynamic impact of large wind farms on power system stability*. PhD thesis,, kth royal institute of technology edição, 2012.
- [11] Technical report. *Modelling of GE wind turbine-generators for grid studies*. GE Energy, abril 2015.
- [12] George Dvorsky. Novas turbinas eólicas prometem fornecer energia ao Japão por 50 anos após um tufão. URL: <http://gizmodo.uol.com.br/turbina-eolica-tufao-japao/> [último acesso em 2016-5-16].
- [13] Turbinas eólicas híbridas poderão gerar energia sem vento. URL: <http://www.dicasverdes.com/2010/10/>

- turbinas-eolicas-hibridas-poderao-gerar-energia-sem-vento/ [último acesso em 2017-5-16].
- [14] Epoch Times. Turbina eólica flutuante leva energia a lugares remotos. URL: <https://www.epochtimes.com.br/turbina-eolica-flutuante-leva-energia-lugares-remotos/#.WUvr2mgrKUK> [último acesso em 2017-5-16].
- [15] Sheerwind. URL: <http://sheerwind.com/> [último acesso em 2017-5-16].
- [16] China, u.s. and japan to lead global installed pv capacity in 2016. URL: <http://www.solarpowerworldonline.com/2016/02/china-u-s-and-japan-to-lead-global-installed-pv-capacity-in-2016/> [último acesso em 2017-5-19].
- [17] Unknown. Energia solar em portugal. URL: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Energia\\_solar\\_em\\_Portugal](https://pt.wikipedia.org/wiki/Energia_solar_em_Portugal) [último acesso em 2017-6-23].
- [18] Unknown. Brasil está construindo a maior usina de energia solar da américa latina. URL: <http://www.conexaolusofona.org/brasil-esta-construindo-a-maior-usina-de-energia-solar-da-america-latina/> [último acesso em 2017-7-7].
- [19] Cláudio Monteiro. Slides energia solar, 2016.
- [20] 3 solar innovations to watch. URL: <https://www.mnn.com/earth-matters/energy/stories/solar-energy-innovations-watch> [último acesso em 2017-7-7].
- [21] These sky-high balloons could generate more power than solar panels. URL: <https://www.fastcompany.com/3053998/these-sky-high-balloons-could-generate-more-power-than-solar-panels> [último acesso em 2017-7-7].
- [22] José António Beleza Carvalho José Rodrigo Pereira. Neutro à terra. *Neutro à Terra*, páginas 3–17, junho 2014.
- [23] CTE8 (IEP). *Características da Tensão fornecida pelas redes de distribuição pública de energia elétrica (NP EN 50160*. IPQ, 2010.
- [24] João Abel Peças Lopes. *Instalações Eléctricas Industriais, Perturbações na Tensão e seus Impactos na Exploração de Redes Eléctricas Industriais*. FEUP, 2000.
- [25] IEEE Standard 519-1992. *Recommendation Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power System*. IEEE, 1993 edição, 1993.
- [26] D. Blume e T.Stephanylome J. Schlabbach. *Voltage Quality in Electrical Power System*. Institution of Electrical Engineers, london edição, 2001.
- [27] W. Mack Grady. *Harmonics and how they related to Power Factor*. Proc. Of EPRI power quality issues and opportunities conference, san diego edição, 1993.
- [28] Despacho Nº 7253/2010. *D. R. 2ª Série, Parte E" Nº 80*. pp 21945-21949, 26 de abril de 2010 edição, 2010.

- [29] A. J. Conejolo G. Exposito e C. Canizares. *Electric energy systems, analysis and operation*. Taylor and Francis Group LLC, new york edição, 2009.
- [30] Erika Nunes. Histórico. já estamos a exportar mais eletricidade do que importamos. URL: <http://www.dn.pt/dinheiro/interior/historico-ja-estamos-a-exportar-mais-eletricidade-do-que-importamo-8570139.html> [último acesso em 2017-6-18].
- [31] Vitor M. Turbina eólica gigante está a bater todos os recordes de produção. URL: <https://pplware.sapo.pt/informacao/esta-turbina-gigante-esta-a-bater-recordes-de-producao-de-energia/> [último acesso em 2017-2-2].
- [32] A. A. M Sayig Fred C. Treble. *Generating Electricity From the Sun*. Oxford:Pergamon Press, 1991.
- [33] Energia solar fotovoltaica. URL: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Energia\\_solar\\_fotovoltaica#Inversores](https://pt.wikipedia.org/wiki/Energia_solar_fotovoltaica#Inversores) [último acesso em 2017-7-7].
- [34] H.M Usman Shafique Syed Ahsan Ali Tehseen Elahi, Mian Haseeb Mushtaq. Solar power generation using concentrated technology. *IEEE*, páginas 1–4, junho Unknown.
- [35] 5 solar innovations that are revolutionizing the world. URL: <https://www.ecowatch.com/5-solar-innovations-that-are-revolutionizing-the-world-1882043841.html> [último acesso em 2017-7-7].
- [36] N.R. Watson J. Arrillaga e S. Chen. *Power System Quality Assessment*. John Wiley and Sons, 2000.